

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ С.М. КИРОВА»

ИЗВЕСТИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКОЙ
АКАДЕМИИ

Выпуск 251

Издаются с 1886 года

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ
2024

РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

Главный редактор

И.А. Мельничук, канд. с.-х. наук, доц., СПбГЛТУ

Заместитель главного редактора

А.А. Добровольский, канд. с.-х. наук, доц., СПбГЛТУ

Ответственный секретарь

И.А. Зверев, СПбГЛТУ

Члены совета

А.В. Жигунов, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,

А.В. Васильев, д-р хим. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,

А.В. Селиховкин, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,

А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

В.А. Александров, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ, УГТУ,

А.С. Алексеев, д-р геогр. наук, проф., СПбГЛТУ,

М.Н. Белгасем, д-р хим. наук, проф., Гренобльский технологический институт,

Н.В. Беляева, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,

А.В. Васильев, д-р хим. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,

Н.В.К. Вебер, д-р с.-х. наук, проф., Дрезденский технический университет (Германия),

А.Ю. Виноградов, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,

Е.В. Голосова, д-р с.-х. наук, проф., ФГБУН «Ордена трудового красного знамени Никитский ботанический сад – национальный научный центр РАН» (Московское представительство), СПбГЛТУ,

Д.А. Данилов, д-р с.-х. наук, СПбГЛТУ, Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха,

К. Деглиз, проф., Университет Лотарингии,

Д.В. Евтюгин, д-р хим. наук, профессор, Университет Авейру (Португалия),

А.В. Жигунов, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,

С.В. Залесов, д-р с.-х. наук, проф., УГЛТУ,

М.Е. Игнатьева, канд. с.-х. наук, проф., Университет Западной Австралии (Австралия),

А.А. Леонович, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,

С.С. Макаров, д-р с.-х. наук, РГАУ-МСХА им. Тимирязева,

М.Ю. Мандельштам, д-р биол. наук, доц., СПбГЛТУ,

Д.Л. Мусолини, д-р биол. наук, доц., Европейская и Средиземноморская организации по карантину и защите растений (Франция),

В.Ю. Нешатаев, д-р биол. наук, доц., СПбГЛТУ,

В.Н. Петров, д-р экон. наук, проф., СПбГЛТУ,

Е.К. Потокзина, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбНИИЛХ,

А.В. Пранович, д-р биол. наук, Академия Або,

В.Г. Санаев, д-р техн. наук, проф., БГТУ им. Н.Э. Баумана,

А.В. Селиховкин, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, СПбГУ,

А.П. Соколов, д-р техн. наук, проф., ПетрГУ,

С.А. Угрюмов, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,

Л.В. Уткин, д-р техн. наук, проф., СПбПУ, СПбГЛТУ,

Д.М. Черниковский, д-р с.-х. наук, доц., СПбГЛТУ,

А.Н. Чубинский, д-р техн. наук, проф., СПбГЛТУ,

А.П. Смирнов, д-р с.-х. наук, проф., СПбГЛТУ,

Е.Г. Хитров, д-р техн. наук, СПбГЛТУ, СПбПУ,

А.В. Шелоумов, д-р техн. наук, СПбГЛТУ,

Р.В. Щекалев, д-р с.-х. наук, СПбГЛТУ,

В.Т. Ярмишко, д-р биол. наук, проф., СПбГЛТУ, БИН РАН

Адрес редакции, издателя,

типографии: 194021, г. Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, литер У. Сайт организации: www.spbfu.ru

Факс: (812) 670-93-90.

Сайт издания: izvestia.spbfu.ru

Тел.: (812) 670-92-59.

E-mail: izvestiya.spblta@mail.ru

Издание зарегистрировано Федеральной службой по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия Российской Федерации. Свидетельство о регистрации средства массовой информации ПИ № ФС77-23613 от 10.03.2006.

УДК 630

Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии: Вып. 251. Санкт-Петербург: СПбГЛТУ, 2024. – 404 с. – ISBN 978-5-9239-1509-9, ISSN-р: 2079-4304, ISSN-е: 2658-5871.

В очередном выпуске сборника научных трудов «Известия СПбЛТА» представлены результаты текущих исследований по лесному хозяйству, лесозаготовкам и механизации лесосечных работ, механической и химической переработке древесины. Сборник предназначен для работников лесного комплекса, преподавателей, аспирантов, студентов и выпускников лесотехнических вузов, сотрудников НИИ лесного профиля.

Темплан 2024 г. Изд. № 210

ISBN 978-5-9239-1509-9

ISSN-р: 2079-4304, ISSN-е: 2658-5871

© Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет имени С.М. Кирова (СПбГЛТУ), 2024

Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation

State Budget Institution of Higher Education
«SAINT PETERSBURG STATE FOREST TECHNICAL UNIVERSITY
NAMED AFTER S.M. KIROV»

IZVESTIA
SANKT-PETERBURGSKOJ
LESOTEHNICESKOJ
AKADEMII

Issue 251

Published since 1886

SAINT PETERSBURG
2024

EDITORIAL COUNCIL

Editor-in-Chief

I. Melnichuk, PhD (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University

Deputy Editor-in-Chief

A.A. Dobrovolsky, PhD (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University

Executive Secretary

I.A. Zverev, St. Petersburg State Forest Technical University

Council members

A.V. Zhigunov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.V. Vasiliev, DSc (Chemical), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.V. Selikhovkin, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.N. Chubinsky, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University

EDITORIAL BOARD

V.A. Aleksandrov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.S. Alekseev, DSc (Geography), St. Petersburg State Forest Technical University,

N. Belgacem, PhD, Grenoble Institute of Engineering (Grenoble),

N.V. Belyaeva, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.V. Vasiliev, St. Petersburg State Forest Technical University,

N. Weber, PhD, Dresden Technical University (Dresden),

A.Yu. Vinogradov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

E.V. Golosova, DSc (Agriculture), Order of the Red Banner of Labor Nikitsky Botanical Garden –

National Scientific Center of the Russian Academy of Sciences (Moscow),

D.A. Danilov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

X. Deglise, PhD, International Academy of Wood Sciences (Hamburg)

D.V. Evtyugin, PhD, University of Aveiro (Aveiro),

A.V. Zhigunov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

S.V. Zalesov, DSc (Agriculture), Ural State Forest Engineering University (Ekaterinburg),

M.E. Ignateva, PhD, University of Western Australia (Perth),

A.A. Leonovich, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

S.S. Makarov, DSc (Agriculture), Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural,

M.Yu. Mandelshtam, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,

D.L. Musolin, DSc (Biology), European and Mediterranean Plant Protection Organization (France),

V.Yu. Neshataev, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,

V.N. Petrov, DSc (Economics), St. Petersburg State Forest Technical University,

E.K., Potokina, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.V. Pranovich, PhD, Åbo Akademi University (Turku),

V.G. Sanaev, DSc (Technical), Bauman Moscow State Technical University (Moscow),

A.V. Selikhovkin, DSc (Biology), St. Petersburg State Forest Technical University, St. Petersburg State University,

A.P. Sokolov, DSc (Technical), Petrozavodsk State University (Petrozavodsk),

S.A. Ugryumov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

L.V. Utkin, DSc (Technical), Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

D.M. Chernikhovskii, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.N. Chubinsky, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

A.P. Smirnov, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

E.G. Khitrov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University,

A.V. Sheloumov, DSc (Technical), St. Petersburg State Forest Technical University,

R.V. Shechekalev, DSc (Agriculture), St. Petersburg State Forest Technical University,

V.T. Yarmishko, DSc (Biology), Komarov Botanical Institute of RAS

Address of the Editorial Office,

Publisher, Printing House 194021, Russia, St. Petersburg, Institutskiy per., 5, lit. U.

Fax: +7(812)670-93-90.

Tel.: +7(812)670-92-59.

Organization's website: www.spbftu.ru

Serial's website: izvestia.spbftu.ru

E-mail: izvestiya.spbfta@mail.ru

The serial is registered by the Federal service on supervision of legislation observance in the sphere of mass communications and protection of cultural heritage of the Russian Federation. The certificate on registration of mass media of PI no. FS77-23613 of 10.03.2006.

UDC 630

Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii: Iss. 251. Saint-Petersburg.: SPbFTU, 2024. – 404 p. – ISBN 978-5-9239-1509-9, ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871.

The next release of «Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii» represents results of the current researches on forestry, logging and mechanization of logging, mechanical and chemical processing of wood. The papers are intended for workers of the forest complex, teachers, scientists and graduate students of forest, agricultural and biological higher education institutions, staff of scientific research institutes in the field of forest sciences.

Templan 2024 r. Izd. N 210

ISBN 978-5-9239-1509-9

ISSN-p: 2079-4304, ISSN-e: 2658-5871

© Saint Petersburg State Forest Technical University (SPbFTU), 2024

ПРЕДИСЛОВИЕ

В сборнике научных трудов «Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии» публикуются оригинальные научные и обзорные статьи, отдельные разделы диссертаций, материалы о патентах и внедрении в производство законченных научных работ, статьи о проблемах высшего лесотехнического образования, об истории становления лесного хозяйства, лесной, деревообрабатывающей и целлюлозно-бумажной промышленности. «Известия СПбЛТА» издаются с 1886 года, выходят четыре раза в год и являются научным изданием лесотехнического профиля, включенным ВАК РФ в новый Перечень рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, на соискание ученой степени доктора наук. С 2005 года «Известия СПбЛТА» включены в систему по созданию российского индекса научного цитирования (РИНЦ) – www.elibrary.ru. Издание включено в Каталог «Пресса России» (индекс 11215).

Издание предназначено для работников лесного комплекса, преподавателей, научных сотрудников, аспирантов, студентов лесотехнических вузов, НИИ лесного профиля и выпускников университета. «Известия СПбЛТА» принимают публикации на русском, английском и немецком языках зарубежных и отечественных авторов, поддерживающих развитие международного сотрудничества в области наук о лесе и древесине. Надеемся, что каждый читатель найдет здесь статью по своим интересам.

Все замечания и пожелания будут обязательно рассмотрены и по возможности учтены в последующих изданиях. Просим направлять их по адресу: 194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., д. 5, редакция «Известий СПбЛТА», или izvestiya.spblta@mail.ru.

Редколлегия

1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 635.054

С.Н. Шлапакова, И.В. Алехина, М.А. Хоменок, А.Н. Морозов

ЗИМОСТОЙКОСТЬ, ЗАСУХОУСТОЙЧИВОСТЬ И ОЦЕНКА ДЕКОРАТИВНОСТИ *CORYLUS AVELLANA* L. В УСЛОВИЯХ Г. БРЯНСКА

Введение. Зимостойкость растений – это наследственное свойство генотипа противостоять комплексу неблагоприятных зимних факторов.

Вместе с тем стоит отметить, что степень зимостойкости вида или сорта, обусловленная даже наследственно, не является величиной постоянной, она в большей мере изменяется в зависимости от условий произрастания растения [Коновалов, 1973; Петровская-Баранова, 1983].

Показатели зимостойкости часто используют при оценке устойчивости органов древесных растений к низкой температуре с учетом всего комплекса неблагоприятных условий зимы, а также периода нахождения растений в состоянии покоя [Петровская-Баранова, 1983].

Материалы и методика исследования. Засухоустойчивость растений определяли по методике Г.Н. Шестаченко и Т.В. Фальковой «Методические рекомендации по оценке засухоустойчивости древесных растений». Оценку степени повреждения растений (увядание листьев, наличие ожогов листьев, летний листопад) проводили визуально, во время продолжительной засухи по следующей шкале:

- 5 – растения не имеют повреждений;
- 4 – со слабыми повреждениями (подгорают края листьев и цветки);
- 3 – сильное повреждение (листья и цветки сильно обгорают и осыпаются);
- 2 – повреждаются очень сильно (оголяется крона, листья засыхают, не осыпаются);
- 1 – растения гибнут.

Зимостойкость растений оценивали по 7-балльной шкале ГБС АН, разработанной П.И. Лапиным, С.В. Сидневой [Петровская-Баранова, 1983]:

- I – повреждений нет (растение не обмерзает);

- II – обмерзает не более половины длины однолетних побегов;
- III – обмерзают однолетние побеги полностью;
- IV – обмерзают двулетние и более старые части растений;
- V – обмерзает крона до уровня снегового покрова;
- VI – обмерзает вся надземная часть;
- VII – растение вымерзает полностью.

Для оценки декоративности исследуемых кустарников нами была применена «Методика комплексной оценки декоративности древесных растений», разработанная О.Ю. Емельяновой [Емельянова, 2016]. Оценка проводилась ежемесячно по шести критериям по пятибалльной шкале. Градации признаков определены для оценок «1», «3» и «5» (табл. 1). Оценки «2» и «4» выставляются при промежуточных показателях признаков. Используя данную шкалу, можно определить степень декоративности (Д). Для этого ежемесячно для каждого растения выставляются балльные оценки, их умножают на коэффициент весомости признака, затем суммируют произведения:

$$D_n = \sum B_o \cdot K_b, \quad (1)$$

где D_n – декоративность в определенный месяц; B_o – балльная оценка; K_b – коэффициент весомости признака.

Таблица 1

Шкала градаций признаков для комплексной оценки декоративности древесных растений в течение года (по О.Ю. Емельяновой)

A scale of gradations of signs for a comprehensive assessment of the decorative value of woody plants during the year (according to O.Y. Yemelyanova)

При- знак	Балльная оценка (B_o)			K_b
Архитектоника кроны	Архитектоника уродливая, вызывающая негативные эмоции (бесформенная или однобокая крона, искривленный ствол, ветви распределены хаотично и т. д.)	Форма кроны не четко выраженная, приближающаяся к правильной	Форма кроны четко выраженная, правильная или оригинальная (карликовая; плакучая, шаровидная, стелющаяся и т. д.), вызывающая положительные эмоции (прямой или изящно изогнутый ствол с равномерно или оригинально распределенными ветвями)	5

Окончание табл. 1

При- знак	Балльная оценка (Б ₀)			К _в
Листья/хвоя	Одноцветная – с однородно окрашенной с обеих сторон в зеленые тона листовой пластинкой. Листовая мозаика не выражена. Для осенней окраски – тускло окрашенные, не контрастирующие с окраской ствола и ветвей либо не меняющие окраску	Верхняя и нижняя поверхности пластинки листа (хвои) имеют различную, не ярко выраженную окраску. Листовая мозаика выражена слабо. Для осенней окраски – неярко окрашенные, слабо контрастирующие с окраской ствола и ветвей	Яркая нетипичная окраска: пятнистые, пестрые, окаймленные или однородные с ярко окрашенной с обеих сторон пластинкой (кроме зеленых). Листовая мозаика ярко выражена. Для осенней окраски – ярко окрашенные, контрастирующие с окраской ствола и ветвей	4
Цветки и соцветия	Не контрастирующие с общим цветовым фоном кроны. Обильность цветения низкая (цветки занимают до 25% площади кроны)	Неярко окрашенные, незначительно контрастирующие с общим цветовым фоном кроны. Обильность цветения средняя (цветки занимают около 50% площади кроны)	Ярко окрашенные, резко контрастирующие с общим цветовым фоном кроны. Обильность цветения высокая (цветки занимают до 100% площади кроны)	3
Плоды(шишки)	Недекоративные, малозаметные на общем цветовом фоне кроны	Красивые, неярко окрашенные, незначительно контрастирующие с общим цветовым фоном кроны	Очень красивые, интенсивно окрашенные, контрастирующие с общим цветовым фоном кроны и усиливающие общий декоративный эффект растения	2
Окраска и фактура коры	Кора невыразительная, грязных оттенков (бурая, серая, темно-серая). Фактура коры глубоко-трещиноватая	Кора неярких тонов (светло-серая, коричневая, темно-коричневая, черная). Фактура коры мелко-трещиноватая или пластинчатая	Кора чистых ярких тонов (белая, желтая, желто-оранжевая, светло-коричневая, красная, зеленая, пятнистая), контрастирующая с цветом листьев (хвои). Фактура коры гладкая	1
Оригинальность вид	Растение имеет обычный по всем оцениваемым признакам вид	Растение оригинально по двум оцениваемым признакам	Растение оригинально по 4–5 оцениваемым признакам	1

Для оценки лещины обыкновенной в условиях г. Брянска нами были подобраны 9 учетных площадок (УП).

Объектами исследования являются растения лещины обыкновенной, произрастающие на территории Ботанического сада им. Б.В. Гроздова, в Центральном парке культуры и отдыха им. 1000-летия Брянска, а также на дворовых и приусадебных территориях города.

В табл. 2 представлена инвентаризация исследуемых растений лещины обыкновенной и ее культивара 'Purpurea'.

В Ботаническом саду им. Б.В. Гроздова в г. Брянске для исследований отобраны 4 экземпляра лещины обыкновенной и 2 экземпляра лещины обыкновенной 'Purpurea', высаженные в качестве группы.

В Центральном парке культуры и отдыха им. 1000-летия Брянска нами отобраны 8 экземпляров лещины обыкновенной, представляющие собой чистую группу.

На улице Малыгина, дом 49, на дворовой территории для исследований взяты 3 шт. лещины обыкновенной 'Purpurea'; на улице Карачижская, д. 106, улице Спартаковская, д. 118, улице Советская, д. 134 – по 3 шт. лещины обыкновенной на каждой дворовой территории (суммарно 9 шт.).

На улице Малыгина, д. 9, на территории приусадебного участка для исследований взяты 2 шт. лещины обыкновенной 'Purpurea', на улице Бежицкая, д. 8 – 7 экземпляров лещины обыкновенной.

Таким образом, общее количество исследуемых кустарников составило 35 экземпляров.

Оценку зимостойкости лещины обыкновенной проводили в конце марта – начале апреля, когда отмечался более устойчивый температурный режим, и после окончания и возвратов поздневесенних заморозков.

Результаты исследования. При создании различных элементов зеленых насаждений в городской и парковой среде важным критерием являются декоративные качества древесных растений. Особый интерес всегда представляют деревья и кустарники, декоративность которых проявляется в течение всего года. К основным декоративным свойствам древесных растений следует отнести: архитектуру кроны, форму и окраску ствола, ветвей, листьев, соцветий, цветков и плодов, а также сроки вегетации, продолжительность цветения и плодоношения растений.

Нами проведена ежемесячная оценка декоративности лещины обыкновенной и лещины 'Purpurea' по методике О.Ю. Емельяновой «Шкала градаций признаков для комплексной оценки декоративности древесных растений в течение года». Сумма баллов за год показывает степень декоративности растения в дизайне городской и парковой среды. Максимальная оценка декоративности за месяц составляет 80 баллов.

Таблица 2

**Таксационная характеристика лещины обыкновенной и ее культивара
на объектах исследования в г. Брянске**

**Taxation characteristics of common hazel and its cultivar
at the research facilities in Bryansk**

Вид / культивар	Возраст, лет	Количество растений, шт.	Высота, м	Диаметр куста, м	Число побегов, шт.	
					однолетних	многолетних
Ботанический сад им. Б.В. Гроздова						
УП 1 Лещина обыкновенная	40–45	4	5,8±0,2	2,9±0,2	11,3±2,3	18,6±1,1
УП 2 Лещина обыкновенная 'Purpurea'	15–20	2	3,8±0,1	2,8±0,2	7,3±2,1	13,3±2,1
Центральный парк культуры и отдыха им. 1000-летия Брянска						
УП 3 Лещина обыкновенная	20–25	8	4,3±0,1	3,5±0,2	26,3±2,1	14,0±2,6
ул. Малыгина, д.49 (дворовая территория)						
УП 4 Лещина обыкновенная 'Purpurea'	10	3	2,3±0,1	3,2±0,3	16,3±1,5	9,3±1,5
ул. Карачижская, д.106 (дворовая территория)						
УП 5 Лещина обыкновенная	15–20	3	3,4±0,1	3,5±0,1	18,6±1,1	14,1±1,7
ул. Спартаковская, д.118 (дворовая территория)						
УП 6 Лещина обыкновенная	15–20	3	3,7±0,2	3,6±0,3	19,3±1,2	15,7±1,5
ул. Советская, д.34 (дворовая территория)						
УП 7 Лещина обыкновенная	25–30	3	4,1±0,1	3,4±0,2	18,3±1,5	12,1±1,1
ул. Малыгина, д.9 (приусадебная территория)						
УП 8 Лещина обыкновенная 'Purpurea'	15	2	3,4±0,1	3,0±0,1	28,1±1,7	18,7±2,1
ул. Бежицкая, д.8						
УП 9 Лещина обыкновенная	25–30	7	4,5±0,9	3,3±0,7	31,1±3,2	22,6±2,4

На рис. 1 представлены показатели зимостойкости *Corylus avellana* в условиях г. Брянска.

Анализ диаграммы на рис. 1 показывает, что в условиях г. Брянска у всех исследуемых растений лещины обыкновенной и лещины обыкновенной 'Ригригеа' повреждения зимними низкими температурами не обнаружены, все экземпляры получили 1 балл (высокая зимостойкость).

Другим важным показателем в оценке перспективности использования растений на объектах ландшафтной архитектуры является показатель засухоустойчивости. Действие засухи сказывается на водном обмене растений. Большая потеря воды за счет интенсивной транспирации вызывает развитие в растении водного дефицита, что может привести к гибели.

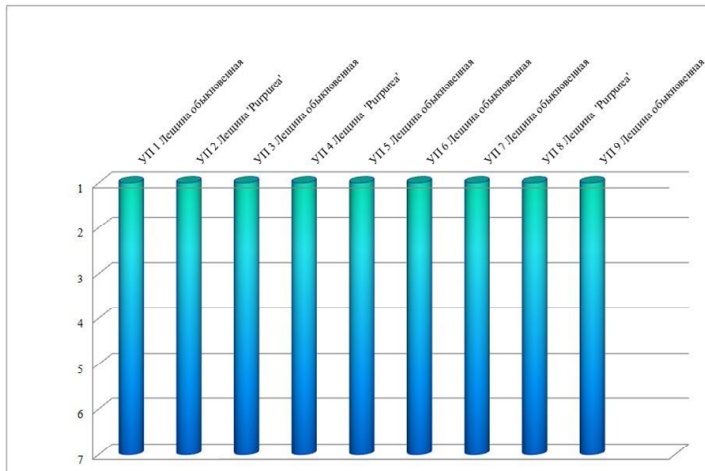


Рис. 1. Зимостойкость *Corylus avellana* в условиях г. Брянска

Fig. 1. Winter hardiness of *Corylus avellana* in the conditions of Bryansk

Засуха характеризуется длительным, а иногда и кратковременным периодом отсутствия осадков, повышенной температурой воздуха, увеличением дефицита насыщения влажности воздуха, что вызывает усиление транспирации, в результате чего происходят обезвоживание и перегрев растений, вызывающие их повреждение и гибель [Генкель, 1982].

На рис. 2 представлены показатели засухоустойчивости *Corylus avellana* в условиях г. Брянска.

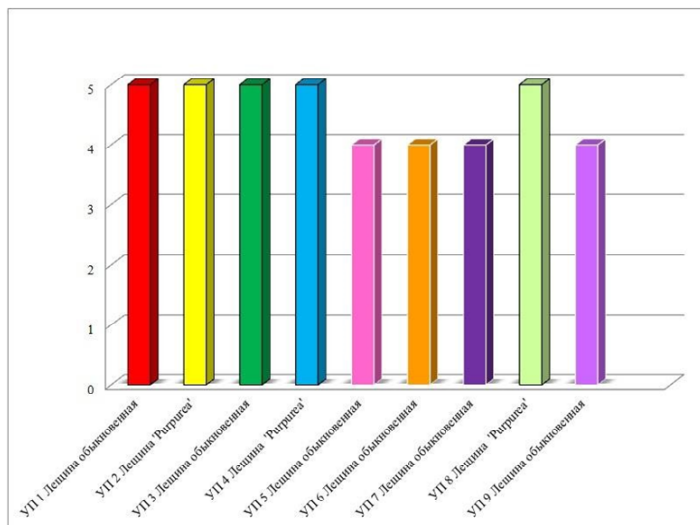


Рис. 2. Засухоустойчивость *Corylus avellana* в условиях г. Брянска
 Fig. 2. Drought tolerance of *Corylus avellana* in the conditions of Bryansk

Анализируя диаграмму, представленную на рис. 2, отмечаем, что на УП 5, 6, 7 и 9 у экземпляров лещины обыкновенной в начале августа были выявлены слабые повреждения в виде подгорания краев листьев, при этом преждевременного листопада и отмирания побегов не обнаружено. Растения на вышеуказанных УП получили 4 балла (слабое повреждение).

Растения лещины обыкновенной, произрастающие на территории Ботанического сада им. Б.В. Гроздова и в Парке культуры и отдыха им. 1000-летия Брянска, получили 5 баллов по шкале засухоустойчивости; вероятнее всего, это связано с относительно тенивыми участками данных экспозиций.

У всех экземпляров лещины обыкновенной 'Ругригеа' в засушливый период ожоги, увядание и иные повреждения не выявлены, что свидетельствует о высокой засухоустойчивости растений в условиях урбанизированной среды.

Таким образом, на основе результатов исследования можно сделать вывод, что в условиях г. Брянска все исследуемые растения лещины обыкновенной и ее формы 'Ругригеа' обладают высокой зимостойкостью и хорошей засухоустойчивостью, а, значит, являются перспективными для использования на объектах ландшафтной архитектуры. Однако у отдельных экземпляров лещины, произрастающих на открытых участках, в засушливый период на листьях может наблюдаться подгорание их краев.

На рис. 3 представлен график ежемесячной декоративности лещины обыкновенной и лещины 'Ругригеа' в условиях г. Брянска.

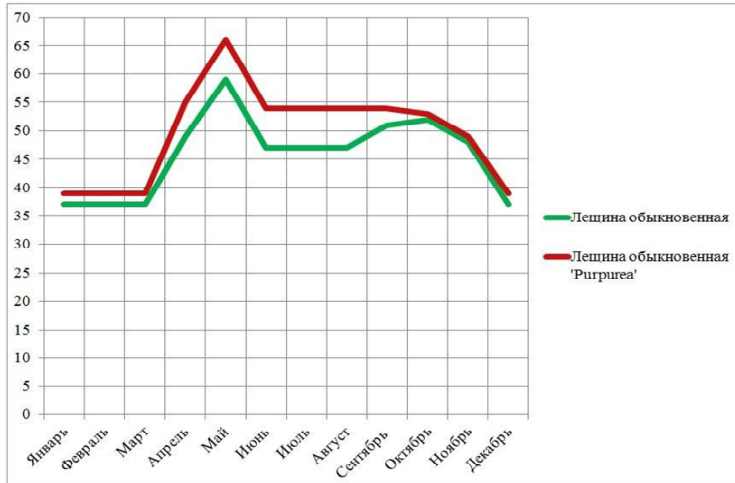


Рис. 3. График ежемесячной декоративности растений

Fig. 3. A graph of monthly plants decorative

Анализ рис. 3 показывает, что наибольшую декоративность по всем месяцам имеет лещина обыкновенная 'Purpurea'. Максимально высокая декоративность по всем морфологическим признакам у лещины обыкновенной и лещины 'Purpurea' установлена в мае. В это время продолжают декорировать мужские соцветия – сережки, которые у видовой лещины имеют характерный золотистый оттенок, а у лещины 'Purpurea' – светло-розовый или бурый, а на их фоне формируются нежно-зеленые и багряные округлые листья.

В осеннее время лещина обыкновенная сменяет свои светло- и темно-зеленые листья на нежно-золотистые и желтые, а у формы 'Purpurea' они становятся более темными, иногда с небольшим оранжевым или золотистым оттенком.

Заключение. На основе ежемесячных оценок декоративности морфологических признаков лещины обыкновенной и лещины 'Purpurea' нами была получена общая сумма баллов, которая показывает степень декоративности растения за год в условиях г. Брянска. На основе проведенной комплексной оценки декоративности лещина обыкновенная получила 548 баллов, а лещина обыкновенная 'Purpurea' – 595 баллов, что означает отнесение исследуемых растений к группе высокодекоративных кустарников для использования в озеленении.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Генкель П.А. Физиология жаро- и засухоустойчивости растений. М.: Наука, 1982. 280 с.

Емельянова О.Ю. К методике комплексной оценки декоративности древесных растений // Современное садоводство. 2016. № 3 (19). С. 54–74.

Коновалов И.Н. О физиологии морозоустойчивости интродуцируемых древесных растений // Успехи интродукции растений. М.: Наука, 1973. С. 257–266.

Петровская-Баранова Т.П. Физиология адаптации и интродукция растений. М.: Наука, 1983. 152 с.

References

Genkel P.A. Physiology of heat and drought resistance of plants. M.: Nauka, 1982. 280 p. (In Russ.)

Kononov I.N. On the physiology of frost resistance of introduced woody plants. M.: Nauka, 1973, pp. 257–266. (In Russ.)

Petrovskaya-Baranova T.P. Physiology of adaptation and introduction of plants. The success of plant. M.: Nauka, 1983. 152 p. (In Russ.)

Yemelyanova O.Yu. On the methodology of complex assessment of decorative woody plants. Modern gardening, 2016, no. 3 (19), pp. 54–74. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 11.03.2024

Шлапакова С.Н., Алехина И.В., Хоменок М.А., Морозов А.Н. Зимостойкость, засухоустойчивость и оценка декоративности *Corylus avellana* L. в условиях г. Брянска // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 6–16. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.6-16

Оценку зимостойкости лещины обыкновенной проводили в конце марта – начале апреля, когда отмечался более устойчивый температурный режим, и после окончания и возвратов поздневесенних заморозков. Другим важным показателем в оценке перспективности использования растений на объектах ландшафтной архитектуры является показатель засухоустойчивости. Действие засухи сказывается на водном обмене растений. Большая потеря воды за счет интенсивной транспирации вызывает развитие в растении водного дефицита, что может привести к гибели. В условиях г. Брянска все исследуемые растения лещины обыкновенной и ее формы 'Purpurea' обладают высокой зимостойкостью и хорошей засухоустойчивостью, а, значит, являются перспективными для их использования на объектах ландшафтной архитектуры. Однако у отдельных экземпляров видовой лещины, произрастающих на открытых участках, в засушливый период на листьях может наблюдаться подгорание их краев. Проведена ежемесячная оценка декоративности лещины обыкновенной и лещины 'Purpurea' по методике О.Ю. Емельяновой «Шкала градаций признаков для

комплексной оценки декоративности древесных растений в течение года». Сумма баллов за год показывает степень декоративности растения в дизайне городской и парковой среды. Оба вида отнесены к высокодекоративным кустарникам.

Ключевые слова: зимостойкость, засухоустойчивость, декоративность, *Corylus avellana*, обмерзание, кустарник, учетная площадка.

Shlapakova S.N., Alekhina I.V., Khomenok M.A., Morozov A.N. Winter hardiness, drought resistance and assessment of decorativeness of *Corylus avellana* L. in the conditions of Bryansk. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 6–16 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.6-16

The winter hardiness of common hazel was assessed in late March – early April, when a more stable temperature regime was observed, and after the end and return of late spring frosts. Another important indicator in assessing the prospects of using plants in landscape architecture is the drought resistance indicator. The effect of drought affects the water metabolism of plants. A large loss of water due to intensive transpiration causes the development of water deficiency in the plant, which can lead to death. In the conditions of Bryansk, all the studied hazel plants and its form 'Purpurea' have high winter hardiness and good drought resistance, which means that they are promising for their use in landscape architecture. However, in individual specimens of the species hazel growing in open areas, burning of their edges may be observed on the leaves during the dry period. A monthly assessment of the decorative value of common hazel and hazel 'Purpurea' was carried out according to the method of O.Y. Yemelyanova «Scale of gradations of signs for a comprehensive assessment of the decorative value of woody plants during the year». The sum of the points for the year shows the degree of decorative effect of the plant in the design of the urban and park environment. Both species are assigned to highly decorative shrubs.

Keywords: winter hardiness, drought resistance, decorative effect, *Corylus avellana*, freezing, shrub, accounting area.

ШЛАПАКОВА Светлана Николаевна – заведующий кафедрой декоративного растениеводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доцент, кандидат биологических наук. SPIN-код: 7095-4162. ORCID: 0000-0001-9056-5299.

194027, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: shla-svetlana@yandex.ru

SHLAPAKOVA Svetlana N. – PhD (Biological), Head of the Department of Ornamental Plant Growing, St.Petersburg State Forest Technical University, Associate Professor. SPIN-code: 7095-4162. ORCID: 0000-0001-9056-5299.

194027. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: shla-svetlana@yandex.ru

ХОМЕНОК Максим Анатольевич – доцент кафедры ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства Брянского государственного инженерно-технологического университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 5717-9997. ORCID: 0009-0004-1991-1135.

241037, пр. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия. E-mail: dendrolog.maxim@mail.ru

KHOMENOK Maxim A. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Landscape Architecture and Garden Construction of Bryansk State Engineering and Technology University. SPIN- code: 5717-9997. ORCID: 0009-0004-1991-1135

241037. Stanke Dimitrova av. 3. Bryansk. Russia. E-mail: dendrolog.maxim@mail.ru

АЛЕХИНА Ирина Викторовна – доцент кафедры ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства Брянского государственного инженерно-технологического университета, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 2118-6030. ORCID: 0009-0007-4368-4325.

241037, пр. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия. E-mail: alehinaira@yandex.ru

ALYOKHINA Irina V. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Landscape Architecture and Garden Construction of Bryansk State Engineering and Technology University. SPIN-code: 2118-6030. ORCID: 0009-0007-4368-4325.

241037. Stanke Dimitrova av. 3. Bryansk. Russia. E-mail: alehinaira@yandex.ru

МОРОЗОВ Александр Николаевич – ассистент кафедры ландшафтной архитектуры и садово-паркового строительства Брянского государственного инженерно-технологического университета. SPIN-код: 4536-0734. ORCID: 0009-0003-2271-2041.

241037, пр. Станке Димитрова, д. 3, г. Брянск, Россия. E-mail: sandragorn@mail.ru

MOROZOV Alexander N. – Assistant of the Department of Landscape Architecture and Garden Construction of Bryansk State Engineering and Technology University. SPIN-code: 4536-0734. ORCID: 0009-0003-2271-2041.

241037. Stanke Dimitrova av. 3. Bryansk. Russia. E-mail: sandragorn@mail.ru

**М.Б. Мартирова, Н.А. Мамаев, Е.Ю. Варенцова, Б.Г. Поповичев,
В.В. Пахучий, Л.М. Пахучая, А.В. Селиховкин**

ПРОСТРАНСТВЕННАЯ ДИНАМИКА СОСТОЯНИЯ И КОМПЛЕКСОВ БОЛЕЗНЕЙ И ВРЕДИТЕЛЕЙ ТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ СЕВЕРО-ЗАПАДА ЕВРОПЕЙСКОЙ ЧАСТИ РОССИИ

Введение. В лесах северо-запада европейской части территории России преобладают хвойные древостои, однако их доля постепенно снижается. Если в Северо-Западном федеральном округе (СЗФО) без учёта лесопокрытой площади Калининградской области доля хвойных лесов по площади в 1959 г. составляла 82,6%, а по запасу – 76,9%, то в 2008 г. эти значения снизились до 72,0 и 51,2% соответственно. Основной фактор снижения доли хвойных, в особенности по запасу древесины – интенсивное лесопользование. В южных районах СЗФО – Псковской, Новгородской и Вологодской областях – площади хвойных древостоев интенсивно замещаются лиственными и смешанными лесами. В Ленинградской области, напротив, после повышения категории защитности на большей части лесного фонда произошло существенное увеличение доли хвойных лесов [Концепция..., 2015].

Ряд авторов связывает изменение структуры лесного фонда с воздействием климата. В обширном обзоре публикаций о влиянии климата на хвойные леса севера показаны различные ответные реакции хвойных на изменения температуры и влажности, как положительные, так и отрицательные. Рост температуры, с одной стороны, способствует увеличению интенсивности обменных процессов и ускорению роста, а с другой снижает адаптивность к низким температурам – заморозкам и абсолютным минимальным температурам. Увеличивается негативная роль стрессовых факторов, связанных с недостатком влаги. Однако для лесов севера потепление климата, в целом, будет выступать как позитивный фактор [Прожекина, Наквасина, 2022].

Важный биотический фактор, зависящий от изменения климата и влияющий на состояние хвойных, – насекомые-дендрофаги. В последние несколько десятилетий появились многочисленные сообщения о влиянии изменения климата на популяции насекомых-дендрофагов [Lehmann et al., 2020]. В недавней монографии, посвящённой лесной энтомологии, этот во-

прос рассмотрен в отдельной главе, представляющей собой обзор 60 публикаций [Battisti, Larsson, 2023]. Изменение динамики температуры и, в особенности, рост теплообеспеченности и зимних температур оказывают воздействие на насекомых на организменном и популяционном уровнях. Наряду с наличием кормовой породы (дерева-хозяина) эти изменения играют ключевую роль в изменении численности вредителей леса [Battisti, Larsson, 2015], увеличивая частоту и интенсивность вспышек размножения вредителей, как стволовых, так и насекомых-филлофагов [Hof, Svahlin, 2016; Thom et al., 2017; Ivantsova et al., 2019; Селиховкин и др., 2023a]. В ряде исследований показано увеличение частоты вспышек размножения вредителей древесных растений на севере Европы. В частности, очаги зимней пяденицы *Operophtera brumata* (Linnaeus, 1758) и ларенции осенней *Epirrita autumnata* (Borkhausen, 1794) (Lepidoptera: Geometridae) стали чаще фиксироваться в Скандинавии [Tenow, 2013]. В 2006 г. в Республике Коми зафиксирована масштабная вспышка серой лиственничной листовёртки *Zeiraphera griseana* (Hübner, 1799) (Lepidoptera: Tortricidae) на площади 137 тыс. га [Обзор..., 2008, 2021]. Отдельные виды минирующих чешуекрылых стали давать вспышки массового размножения в Санкт-Петербурге и Ленинградской области [Селиховкин, 2023a; Селиховкин, Гниненко, 2023]. Участились вспышки массового размножения короеда-типографа *Ips typographus* (Linnaeus, 1758) [Селиховкин, 2023a]. При этом в последние 40–50 лет произошло внезапное прекращение ранее повторявшихся вспышек ряда видов насекомых-филлофагов. В частности, это явление наблюдается в отношении упомянутой *Zeiraphera griseana*. В Европейских Альпах [Büntgen et al., 2020] и на северо-западе европейской части России несколько десятков лет не отмечались ранее весьма обычные вспышки размножения сосновой пяденицы *Bupalus piniaria* (Linnaeus, 1758) (Geometridae), сосновой совки *Panolis flammea* (Denis et Schiffermüller, 1775) (Noctuidae), лунки серебристой *Phalera bucephala* (Linnaeus, 1758) (Notodontidae), античной *Orgyia antiqua* (Linnaeus, 1758) и ивовой *Leucoma salicis* (Linnaeus, 1758) волнянок (Erebidae) [Селиховкин, Гниненко, 2023]. Тем не менее хвоелистогрызущие и, в особенности, стволовые насекомые остаются одним из ведущих факторов ослабления и гибели хвойных древостоев на северо-востоке Европы и севере европейской части России [Катаев и др., 2001; Маслов, 2010; Гречкин, 2019; Селиховкин и др., 2023a; Komonen et al., 2011; Öhrn, 2012].

Таёжные леса северо-запада европейской части России, – Мурманской, Архангельской и Ленинградской областей, республик Карелия и Коми, –

находятся в зонах средней и сильной лесопатологической угрозы (приказ Федерального агентства лесного хозяйства № 1067 от 26.12.2018 об установлении лесозащитного районирования). Во всех перечисленных регионах патогены и насекомые-вредители отмечаются как один из ведущих факторов ослабления. Даже в Мурманской области, где частота вспышек размножения вредителей и распространения заболеваний весьма низка, доля участия грибных болезней в разные годы была весьма значимой; например, их долевое участие в повреждении насаждений в 2010 г. составляло 25,0%, а в 2019 г. – 55,7%. В перечисленных регионах среди заболеваний преобладает ржавчина хвой ели *Chrysomyxa abietis* (Wallr.) Unger, отмечаются очаги еловой *Phellinus chrysoloma* (Fr.) Donk и сосновой *Porodaedalea pini* (Brot.) Murrill губок, рака биатореллового *Biatorrella difformis* (Fr.) Vain, рака-серянки *Cronartium pini* (Willd.) Jørst., опенка осеннего *Armillaria* spp. и язвенного рака ели [Князева, Эйшлина, 2018; Селиховкин и др., 2016, 2017, 2018а, б; Лесной план Мурманской..., 2019; Обзор..., 2020б, 2022].

В составе насекомых-дендрофагов ведущую роль играют стволовые вредители, в частности короеды (Curculionidae, Scolytinae). Наибольшее значение имеет короед-типограф *Ips typographus* (Linnaeus, 1758), вспышки размножения которого отмечаются во всех перечисленных регионах, кроме Мурманской области [Лесной план Мурманской..., 2019; Лесной план Республики Карелия, 2019; Обзор..., 2020а; Селиховкин и др., 2023а].

Кроме короеда-типографа, существенное влияние на состояние хвойных древостоев северо-запада европейской части России могут оказывать вершинный короед *Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827), короед-гравёр *Pityogenes chalcographus* (Linnaeus, 1760), сосновые лубоеды *Tomicus piniperda* (Linnaeus, 1758) и *Tomicus minor* (Hartig, 1834), большой еловый лубоед (дентроктон) *Dendroctonus micans* (Kugelann, 1794) и короеды-полиграфы *Polygraphus poligraphus* (Linnaeus, 1758) и *P. subopacus* (Thomson, 1871). Потенциальную опасность представляет инвазионный вредитель – союзный короед *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) [Мандельштам, Селиховкин, 2020; Селиховкин и др., 2023а]. В этих регионах нередко отмечается высокая плотность популяций еловой жердняковой смолёвки *Pissodes harycyniae* (Herbst, 1795) [Огибин, 1989; Селиховкин и др., 2018, 2022]. Немаловажное значение имеют и жуки усачи (Cerambycidae) – чёрные усачи *Monochamus urusovi* (Fisher von Waldeim, 1806), *M. sutor* (Linnaeus, 1760), *M. galloprovincialis* (Oliver, 1795) и еловый блестящегрудый усач *Tetropium castaneum* (Linnaeus, 1758) [Огибин, 1989; Огибин и др., 1990; Селиховкин и др., 2016, 2018, 2022, 2023а, б].

Обобщение и анализ данных по вспышкам размножения вредителей ассимиляционного аппарата показали, что существенное увеличение плотности популяций вредителей хвойных в рассматриваемых регионах не отмечалось начиная с завершения вспышки размножения сосновой пяденицы в Ленинградской области в 1997 г. [Селиховкин, Гниненко, 2023]. Исключение составляет уже упомянутая масштабная вспышка размножения серой листовенной листовёртки в Республике Коми [Обзор..., 2008, 2021; Селиховкин, Гниненко, 2023].

Таким образом, изменение характера динамики плотности популяций в северотаёжных лесах в разных группах насекомых существенно отличается и носит выраженный видоспецифический характер. Неочевидной выглядит и гипотеза об однозначном воздействии потепления климата, способствующем увеличению частоты и интенсивности вспышек размножения вредителей. Остаётся открытым вопрос о взаимосвязи насекомых-дендрофагов, патогенов и их растений-хозяев в условиях изменения климата в северотаёжных лесах. Исследование комплексов вредителей и болезней сосны и ели – основных лесообразующих пород северо-запада европейской части России – и динамики состояния древостоев в разных в меридиональном отношении районах – основная цель исследований.

Материалы и методика исследования. Исследования взаимосвязи состояния древостоев и активности вредителей и патогенов проводились с учётом пространственной динамики с перспективой дальнейшего анализа динамики этого процесса во времени. Для решения этой задачи была создана сеть постоянных пробных площадей в хвойных лесах северо-запада европейской части России. В общей сложности было заложено 162 пункта постоянного учёта (ППУ), 87 из которых находились в Ленинградской области, 40 в Республике Карелия, 20 в Мурманской области, 15 в Республике Коми. Все ППУ были заложены в спелых и перестойных древостоях с преобладанием ели или сосны в 2021–2022 гг. (табл. 1).

Пункты постоянного учёта были заложены либо отобраны из ранее заложённых (Карельский перешеек Ленинградской обл.) с учётом подходящих лесорастительных условий (спелые и перестойные древостои, свыше 7 единиц в составе ели или сосны), транспортной доступности и удалённости ППУ друг от друга (не менее 1 км). Учитывалось распределение ППУ по широтам с 59° по 67° с. ш. В меридиональном отношении во всех регионах, за исключением Республики Коми, ППУ располагались в более узком диапазоне – 28–34° в. д.

Таблица 1

Расположение постоянных пробных площадей (ППУ)

Observation plots location

Район	№ группы ППУ	Лесничество	Координаты		Основная порода	Кол-во ППУ
			широта	долгота		
Ленинградская область	1	Учебно-опытное	59°17'–59°32'	30°32'–30°45'	ель	30
	2	Рощинское и Северо-западное	60°16'–61°02'	28°42'–29°57'	ель	27
					сосна	30
Республика Карелия	3	Медвежьегорское и Суоярвское	62°55'–62°57'	34°22'–33°50'	ель	10
					сосна	10
	4	Калевальское, Кемское и Лоухское	64°55'–65°18'	34°08'–31°06'	ель	10
					сосна	10
Мурманская область	5	Кандалакшское	66°57'–67°09'	32°09'–30°25'	ель	5
					сосна	15
Республика Коми	6	Сыктывкарское	61°39'–61°44'	50°45'–51°05'	ель	5
					сосна	10

В итоге было сформировано шесть групп ППУ (табл. 1) с близкими меридиональными координатами и с широтным интервалом от одного до трёх градусов.

На исследуемой территории климат сходный, умеренно-континентальный с сильным влиянием морских воздушных масс Атлантического океана. Соответственно, здесь наблюдаются повышенная влажность, весьма частая смена погодных условий и сравнительно теплая погода зимой и прохладная в течение вегетационного сезона. В Республике Коми климат также умеренно-континентальный, но в Сыктывкарском лесничестве, где были заложены пробные площади, он близок к континентальному [Климат..., 2001].

Закладку ППУ проводили по методике ICP Forest с установкой координатной привязки и пометкой краской центрального дерева [Методика..., 1995; Alekseev, 2018]. От центрального дерева по сторонам света на

расстоянии 25 м отмечали точки, вокруг которых отбирали наиболее близко расположенные 6 деревьев I–III классов Крафта. Эти деревья были отмечены номерами с учётом их расположения относительно центрального дерева. В границах ППУ проводили сплошной перечёт главной породы по методике лесопатологических обследований. Количество деревьев для сплошного перечёта обычно не превышало сотни. Следует отметить, что при проведении оценки состояния деревьев в разных регионах учитывалось изменение параметров характеристики ассимиляционного аппарата, таких как возраст хвои, плотность кроны, интенсивность окраски хвои. После обследования ППУ полученные данные включали следующую информацию о деревьях: диаметр, класс Крафта, категория состояния, степень плодоношения, процент дефолиации и дехромации, наличие вредителей и патогенов на каждом дереве, а также пороков ствола (искривление ствола, многовершинность и т. д.). Для оценки категорий состояния использовалась шкала категорий, предложенная О.А. Катаевым и Е.Г. Мозолевской [Мозолевская и др., 1984; Катаев, Поповичев, 2001] с некоторыми уточнениями, в наибольшей степени отвечающая задачам исследований (табл. 2). Успешное заселение стволовых вредителей на хвойных деревьях неизбежно приводит к гибели дерева в текущем году. Соответственно, при такой ситуации дерево однозначно оценивалось пятой категорией состояния вне зависимости от характеристики кроны. Это позволяло избежать обычных ошибок, характерных для лесопатологических обследований, и адекватно учесть сроки заселения стволовых вредителей [Селиховкин, 2023б]. Также при наличии язв, открытых морозобойных трещин и иных значимых повреждений ствола, мы оценивали состояние дерева второй категорией, даже если состояние кроны соответствовало первой категории.

Статистическая обработка данных по средней категории состояния древостоев и наличию язвенного рака на ППУ проводилась с использованием внутреннего пакета функций Microsoft Excel 2019. Количественные характеристики средней категории состояния на ППУ приведены в форме «ящика с усами», содержащей среднее арифметическое значение категорий состояния (СКС) в группе ППУ, медианное значение, первый и третий квартили, а также выбросы значений СКС в тех ППУ, где они превышали значения выборки либо были сильно ниже. Для исследования зависимости средней категории состояния на ППУ от доли язвенного рака и средней категории состояния древостоев от широты их местонахождения проведен линейный корреляционный анализ.

Таблица 2

Шкала категорий состояния хвойных деревьев**Tree condition category scale**

Категория состояния	Характеристики
1 – здоровые (без признаков ослабления)	Хвоя зелёная, блестящая, крона густая, прирост текущего года нормальный.
2 – ослабленные	Хвоя светлее обычного, крона слабоажурная, прирост уменьшен более чем наполовину. Возможны признаки местного повреждения ствола и корневых лап, ветвей. При наличии местных повреждений характеристики кроны могут соответствовать категории здорового дерева.
3 – сильно ослабленные	Хвоя светло-зелёная или сероватая, матовая, крона ажурная, прирост уменьшен более чем наполовину. Возможны признаки повреждения ствола, корневых лап, ветвей, объедания хвои, возможны попытки поселения или наличие местного поселения стволовых вредителей на стволе и ветвях.
4 – усыхающие	Хвоя серая, желтоватая или жёлто-зелёная, крона заметно изрежена, прирост текущего года ещё заметен или отсутствует. Признаки повреждения ствола и других частей дерева выражены сильнее, чем у предыдущей категории. Возможны признаки повреждения ствола, корневых лап, ветвей, объедания хвои, возможны попытки поселения или наличие местного поселения стволовых вредителей на стволе и ветвях.
5 – сухостой текущего года (свежий сухостой)	Хвоя серая, желтая или бурая, крона часто изрежена, мелкие веточки сохраняются. Как правило, дерево заселено стволовыми вредителями в текущем году. При этом характеристики кроны могут соответствовать категории здорового дерева. В конце сезона возможно наличие на части дерева летних отверстий насекомых.
6 – сухостой прошлых лет (старый сухостой)	В зависимости от года гибели дерева хвоя сохранилась частично или полностью осыпалась, опали веточки разного порядка и в разной степени кора. На коре видны летные отверстия, под корой – входы в древесину личинок усачей и рогохвостов.

Результаты исследования. Диапазоны значений от первой четверти до третьей по возрастанию (Q1-Q3) средней категории состояния древостоев во всех группах, кроме шестой (Коми), сгруппированы в промежутке 1.20–1.98, что соответствует здоровым и ослабленным древостоям (рис. 1, табл. 3 –

ель; рис. 2, табл. 4 – сосна). Различия состояния древостоев в группах 1–5 незначимы. Несколько хуже состояние насаждений в районе Сыктывкара. К сожалению, в этом районе нам не удалось подобрать пробы вне рекреационной зоны. В других регионах ППУ со средней категорией состояния (СКС), соответствующей сильно ослабленному древостою, отсутствовали. Максимальное значение составляло 2.16 (Карельский перешеек).

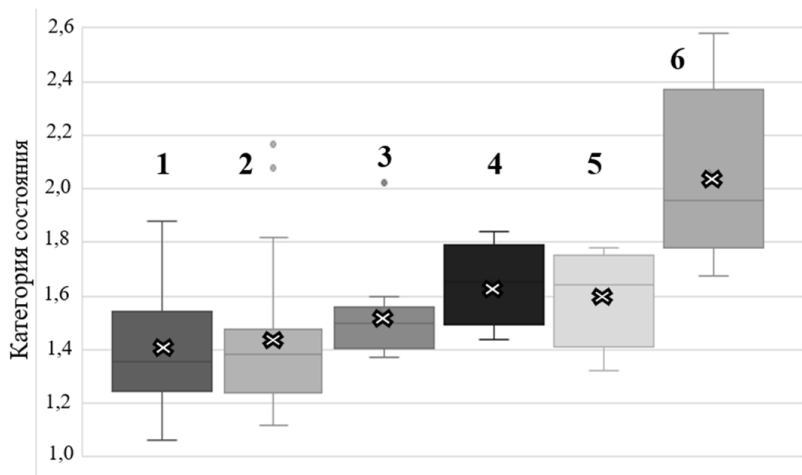


Рис. 1. Распределение ели по категориям состояния на пунктах постоянного учёта (ППУ):

Примечание: среднее – $\otimes$; точки выброса – $\bigcirc$; группы ППУ: 1 – Учебно-опытное лесничество (59° с. ш.); 2 – Карельский перешеек (60° с. ш.); 3 – Медвежьегорское, Суоярвское лесничества (62° с. ш.); 4 – Кемское, Калевальское, Лоухское лесничества (64–65° с. ш.); 5 – Мурманская область (67° с. ш.); 6 – Сыктывкарское лесничество (61° с. ш.)

Fig. 1. Spruce distribution by condition categories on observation plots

Note: mean – $\otimes$; outliers – $\bigcirc$; observation plots groups: 1 – Uchebno-opytное lesnichestvo (59° N); 2 – Karelian isthmus (60° N); 3 – Medvezh'egorskoe, Suoyarvskoe lesnichestvo (62° N); 4 – Kemsкое, Kaleval'skoe, Louhskoe lesnichestvo (64–65° N); 5 – Murmanskaya oblast' (67° N); 6 – Syktyvkarskoe lesnichestvo (61° N)

На некоторых ППУ средние значения состояния древостоя значимо выше средних величин средних категорий состояния и были обозначены как выбросы (рис. 1, 2). Эти величины не укладываются в выборку по СКС из-за высокой доли усыхающих и сухостойных этого года деревьев. Такие ППУ наблюдаются во 2 и 3 группах (Карельский перешеек и район Медвежьегорска) и связаны со вспышкой массового размножения типографа в 2021–2023 годах.

Таблица 3

**Распределение характеристик средних категорий состояния (СКС) ели
на пунктах постоянного учёта (ППУ)**

**Characteristics distribution of mean condition categories of spruce
on observation plots**

Группы ППУ	Значения средней категории состояния							
	Кол-во ППУ	Минимальное значение	Q1	Медианное значение	Q3	Максимальное значение	Среднее арифм.	Ст. откл.
1	30	1.06	1.24	1.36	1.54	1.88	1.40	0.21
2	28	1.12	1.24	1.38	1.47	2.16	1.43	0.25
3	10	1.37	1.42	1.50	1.55	2.02	1.53	0.19
4	10	1.44	1.51	1.66	1.78	1.84	1.64	0.14
5	5	1.32	1.50	1.64	1.73	1.78	1.59	0.19
6	5	1.67	1.88	1.96	2.16	2.58	2.05	0.34

Примечание: группы ППУ: 1 – Учебно-опытное лесничество (59° с. ш.); 2 – Карельский перешеек (60° с. ш.); 3 – Медвежьегорское, Суоярвское лесничества (62° с. ш.); 4 – Кемское, Калевальское, Лоухское лесничества (64–65° с. ш.); 5 – Мурманская область (67° с. ш.); 6 – Сыктывкарское лесничество (61° с. ш.)

Note: plots groups: 1 – Uchebno-opytное lesnichestvo (59° N); 2 – Karelian isthmus (60° N); 3 – Medvezh'egorskoe, Suoyarvskoe lesnichestvo (62° N); 4 – Kemskoe, Kaleval'skoe, Louhskoe lesnichestvo (64–65° N); 5 – Murmanskaya oblast' (67° N); 6 – Syktyvkarское lesnichestvo (61° N)

В сосновых древостоях значения диапазонов Q1–Q3 увеличиваются с юга на север, так же как и медианные значения СКС в выборках, что может говорить о некоторой прямой зависимости СКС соснового насаждения от широты, на которой оно располагается (коэффициент корреляции $R = 0.62$). Если на территории Карельского перешейка древостои здоровые ($\text{СКС} < 1.5$ и, в большинстве случаев, с единственным выбросом), то на территории республик Коми и Карелия, а также в Мурманской области сосновые насаждения находятся в ослабленном состоянии.

Наиболее распространённым заболеванием был язвенный рак ели, вызываемый *Sarea difformis* (Fr.) Fr. и другими патогенными организмами.

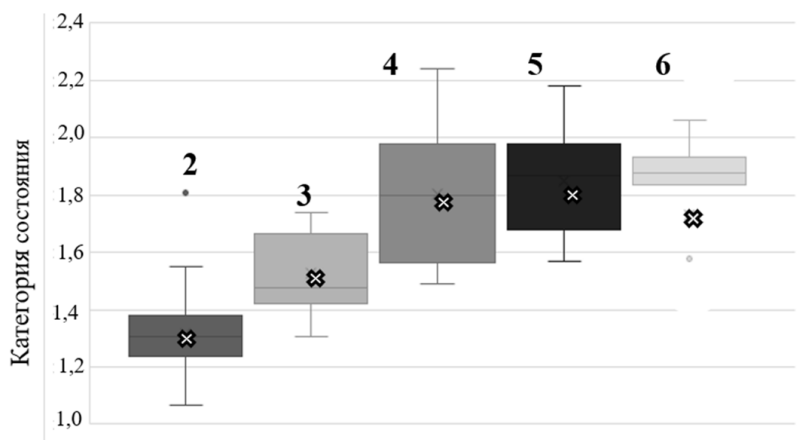


Рис. 2. Распределение сосны по категориям состояния на пунктах постоянного учета (ППУ)

Примечание: среднее – X; точки выброса – ○; группы ППУ: 2 – Карельский перешеек (60° с. ш.); 3 – Медвежьегорское, Суоярвское лесничества (62° с. ш.); 4 – Кемское, Калевальское, Лоухское лесничества (64–65° с. ш.); 5 – Мурманская область (67° с. ш.); 6 – Сыктывкарское лесничество (61° с. ш.)

Fig. 2. Pine distribution by condition categories on observation plots

Note: mean – X; outliers – ○; observation plots groups: 2 – Karelian isthmus (60° N); 3 – Medvezh'egorskoe, Suoyarvskoe lesnichestvo (62° N); 4 – Kemsckoe, Kaleval'skoe, Louhskoe lesnichestvo (64–65° N); 5 – Murmanskaya oblast' (67° N); 6 – Syktyvkarskoe lesnichestvo (61° N)

Для удобства графической презентации полученных данных, ППУ были сгруппированы по категории состояния с шагом 0.2 ед. Доля деревьев с открытым язвенным раком возрастает с увеличением СКС (коэффициент детерминации линейной зависимости $R^2 = 0.58$) (рис. 3).

В сосновых древостоях довольно часто встречались некрозно-раковые заболевания, вызываемые раком-серянкой *Cronartium pini* (Willd.) Jørst., а также ажурность кроны. Зависимость от географического расположения и состояния древостоя на ППУ не выявлена. Сосновая губка *Porodaedalea pini* (Brot.) Murrill встречалась единично во всех группах ППУ, за исключением Мурманской области. Встречались корневые и комлевые гнили на сосне в карельских группах ППУ. Опёнок летний и осенний (комплекс видов *Armillaria* spp. порядка Agaricales Underw.) также были отмечены в некоторых ППУ вплоть до Мурманской области, но очаги этих грибов были обнаружены только в Ленинградской области.

Таблица 4

Распределение характеристик средних категорий состояния (СКС) сосны на пунктах постоянного учёта (ППУ).

Characteristics distribution of mean condition categories of pine on observation plots

Группы ППУ	Значения средней категории состояния							
	Кол-во ППУ	Минимальное значение	Q1	Медианное значение	Q3	Максимальное значение	Среднее арифм.	Ст. откл.
2	30	1.06	1.25	1.30	1.37	1.81	1.31	0.15
3	10	1.31	1.45	1.48	1.64	1.74	1.53	0.15
4	10	1.49	1.60	1.80	1.89	2.24	1.80	0.25
5	15	1.57	1.68	1.87	1.98	2.18	1.85	0.20
6	10	1.58	1.86	1.88	1.93	2.22	1.90	0.16

Примечание: группы ППУ: 2 – Карельский перешеек (60° с. ш.); 3 – Медвежьегорское, Суоярвское лесничества (62° с. ш.); 4 – Кемское, Калевальское, Лоухское лесничества (64–65° с. ш.); 5 – Мурманская область (67° с. ш.); 6 – Сыктывкарское лесничество (61° с. ш.)

Note: plots groups: 2 – Karelian isthmus (60° N); 3 – Medvezh'egorskoe, Suoyarvskoe lesnichestvo (62° N); 4 – Kemsкое, Kaleval'skoe, Louhskoe lesnichestvo (64–65° N); 5 – Murmanskaya oblast' (67° N); 6 – Syktyvkarskoe lesnichestvo (61° N)

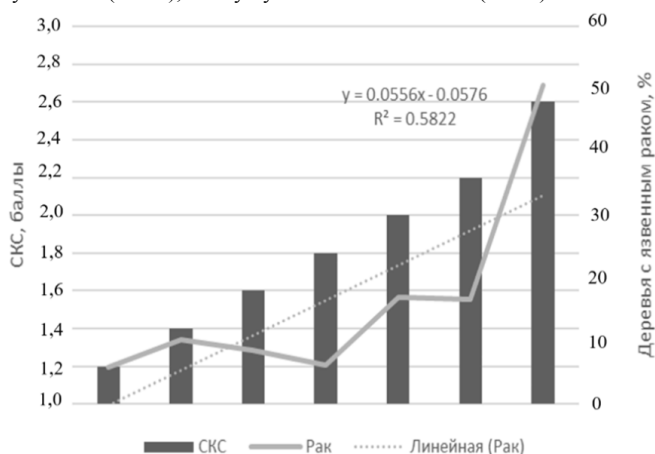


Рис. 3. Встречаемость открытого язвенного рака ели в зависимости от средней категории состояния (СКС) по данным пунктов постоянного учета

Fig. 3. Apperance of spruce open canker in a dependance of mean condition category by data from observation plots

Таблица 5

**Распределение деревьев с наличием язвенных образований
по группам пунктов постоянного учёта (ППУ)**

Distribution of trees with ulcerative formations by observation plots groups

Группа ППУ	Количество ППУ	Деревья, шт.	СКС	Деревья с наличием язв, шт.	Рак, %
1	30	2854	1.40	155	5.4
2	28	2241	1.43	280	12.5
3	10	891	1.53	85	9.5
4	10	992	1.64	77	7.8
5	5	419	1.59	16	3.8
6	5	381	2.05	79	20.7

Примечание: группы ППУ: 1 – Учебно-опытное лесничество (59° с. ш.); 2 – Карельский перешеек (60° с. ш.); 3 – Медвежьегорское, Суоярвское лесничества (62° с. ш.); 4 – Кемское, Калевальское, Лоухское лесничество (64–65° с. ш.); 5 – Мурманская область (67° с. ш.); 6 – Сыктывкарское лесничество (61° с. ш.)

Note: plots groups: 1 – Uchebno-opytное lesnichestvo (59° N); 2 – Karelian isthmus (60° N); 3 – Medvezh'egorskoe, Suoyarvskoe lesnichestvo (62° N); 4 – Kemsckoe, Kaleval'skoe, Louhsckoe lesnichestvo (64–65° N); 5 – Murmanskaya oblast' (67° N); 6 – Syktyv-karsckoe lesnichestvo (61° N)

Хвоегрызущие насекомые на ППУ практически отсутствовали. Типичные для северотаёжных европейских лесов виды и группы видов стволовых вредителей, напротив, встречались во всех группах ППУ, в том числе короед-типограф *Ips typographus*, гравер *Pityogenes chalcographus*, пушистый полиграф *Polygraphus poligraphus* и другие виды рода *Polygraphus*, сосновые лубоеды *Tomicus minor*, *T. piniperda*, древесинники *Trypodendron sp.*, смолевки *Pissodes sp.* (Curculionidae), усачи *Monochamus galloprovincialis*, *M. sutor*, *M. urussovii* и *Tetropium sp.* (Cerambycidae) и рогохвосты (Siricidae), и др.

Встречаемость деревьев, заселённых стволовыми насекомыми, невелика. На территории Ленинградской области довольно часто отмечался короед-типограф. На Карельском перешейке (группа ППУ 2) в 2023 г. отмечено четыре ППУ со значительным присутствием типографа (более 5% деревьев) на свежем сухостое (табл. 5). На юге Ленинградской области

(группа ППУ 1) лишь на двух пробах было отмечено присутствие нескольких деревьев с этим вредителем, а в Республике Карелия в районе Медвежьегорска (группа ППУ 3) было обнаружено только одно дерево. В Мурманской области свежезаселенных деревьев не обнаружилось. Короеды-полиграфы, короед-гравер, смолевки, древесинники и рогахвосты встречались единично.

На сосне основными насекомыми-вредителями были сосновые лубоеды. В Республике Коми (группа ППУ 6) на 10 пробных площадях сосны отмечено 36 деревьев с признаками поселения сосновых лубоедов, – существенно больше, чем в других регионах (табл. 6). Большой сосновый лубоед встречается во всех группах ППУ, но реже, чем малый сосновый лубоед. Единично встречаются рогахвосты (*Siricidae*), чёрный сосновый усач и древесинники.

Таблица 5

Количество деревьев ели (5 категория состояния – свежий сухостой), заселенных стволовыми вредителями, по группам ППУ

Number of spruce trees (Fresh dead-wood) that was populated by wood borer pests sorted by observation plots groups

Группа ППУ	Количество деревьев	<i>Ips typographus</i> , экз./%	<i>Monochamus</i> spp., экз./%	<i>Polygraphus</i> spp., экз./%	<i>Pytiogenes chalcographus</i> , экз./%	<i>Pissodes</i> sp., экз./%
1	2241	111/5	27/1	0/0	1/0	0/0
2	2854	36/1	5/0	1/0	0/0	3/0
3	891	1/0	6/1	0/0	0/0	7/1
4	992	0/0	2/0	1/0	0/0	0/0
5	419	0/0	1/0	0/0	0/0	0/0
6	381	1/0	0/0	2/0	0/0	0/0

Примечание: группы ППУ: 1 – Учебно-опытное лесничество (59° с. ш.); 2 – Карельский перешеек (60° с. ш.); 3 – Медвежьегорское, Суоярвское лесничества (62° с. ш.); 4 – Кемское, Калевальское, Лоухское лесничества (64–65° с. ш.); 5 – Мурманская область (67° с. ш.); 6 – Сыктывкарское лесничество (61° с. ш.)

Note: plots groups: 1 – Uchebno-opytное lesnichestvo (59° N); 2 – Karelian isthmus (60° N); 3 – Medvezh'egorskoe, Suoyarvskoe lesnichestvo (62° N); 4 – Kemskoe, Kaleval'skoe, Louhskoe lesnichestvo (64–65° N); 5 – Murmanskaya oblast' (67° N); 6 – Syktyvkarское lesnichestvo (61° N)

Таблица 6

**Количество деревьев (4–5а), заселенных стволовыми вредителями,
по группам ППУ, сосна**

**Number of pine trees (Fresh dead-wood and shrinking trees) that was populated
by wood borer pests sorted by observation plots groups**

Группа ППУ	Количество деревьев	<i>Tomicus minor</i> , экз./%	<i>Tomicus piniperda</i> , экз./%	<i>Monochamus spp.</i> , экз./%
2	2414	16/1	15/1	10/0
3	965/0	4/0	2/0	4/0
4	985	7/1	7/1	6/1
5	1496	2/0	7/0	4/0
6	809	43/5	5/0	7/0

Примечание: группы ППУ: 2 – Карельский перешеек (60° с. ш.); 3 – Медвежьегорское, Суоярвское лесничества (62° с. ш.); 4 – Кемское, Калевальское, Лоухское лесничества (64–65° с. ш.); 5 – Мурманская область (67° с. ш.); 6 – Сыктывкарское лесничество (61° с. ш.)

Note: plots groups: 2 – Karelian isthmus (60° N); 3 – Medvezh'egorskoe, Suoyarvskoe lesnichestvo (62° N); 4 – Kemsкое, Kaleval'skoe, Louhskoe lesnichestvo (64–65° N); 5 – Murmanskaya oblast' (67° N); 6 – Syktyvkarskoe lesnichestvo (61° N)

Обсуждение. Изменение состояния еловых древостоев в ряду «юг Ленинградской области – Мурманская область» (группы ППУ 1–5) варьирует незначительно. В районе Сыктывкара (группа ППУ 6) состояние ельников существенно хуже, но в этом районе все ППУ расположены на участках с высокой рекреационной нагрузкой и иными видами негативных антропогенных воздействий, и, как сказано выше, ППУ не отвечали условию минимальной антропогенной нагрузки.

Состояние сосновых древостоев несколько ухудшается по мере продвижения к северу. В центральной и северной Карелии, а также на юге Мурманской области почвенные и климатические условия произрастания существенно жестче, чем на Карельском перешейке, однако, как это уже обсуждалось во введении, в данном случае нельзя утверждать, что это ухудшение обусловлено именно климатическими или почвенно-гидрологическими характеристиками. Популяционные особенности, закрепленные в генотипе в течение эволюционно длительного периода и проявляющиеся в фенотипе, обеспечивают достаточно полную адаптацию

локальных популяций к условиям местопроизрастания [Прожерина, Наквасина, 2022; Kelly, 2019]. Возможно, что в данном случае снижение СКС в некоторой степени обусловлено тем, что леса Карелии и юга Мурманской области расстроены рубками.

Роль вредителей и болезней в изменении состояния древостоев может быть весьма существенной. В ельниках в группах ППУ 2 и 3 (Карельский перешеек и район Медвежьегорска) отмечено 3 точки выброса. Их появление связано с размножением короеда-типографа, вспышка массового размножения которого началась в 2021 г. после того, как были определены места закладки ППУ. Вспышка затронула большие площади ельников в Ленинградской области и на юге Карелии [Селиховкин и др., 2022, 2023], однако наблюдения на сети ППУ плохо отражают общую ситуацию, так как очаги распределяются весьма неравномерно [Мартирова, Мамаев, 2024]. В частности, на территории Учебно-опытного лесничества (группа ППУ 1), где долгое время почти не проводились лесохозяйственные мероприятия, зафиксированы только небольшие повреждённые участки, не затронувшие эту группу ППУ. На Карельском перешейке только две ППУ оказались затронуты вспышкой. Если исключить воздействие этого катастрофического события, т. е. вспышки массового размножения короеда-типографа, то в представленном ряду наблюдений вредители не оказывают существенного влияния на состояние древостоев. Вредители ассимиляционного аппарата в сколько-нибудь значимых количествах не встречались, а стволовыми насекомыми в текущем вегетационном сезоне было заселено не более одного процента обследованных деревьев. Исключение составлял короед-типограф, о котором было сказано выше, и сосновые лубоеды на ППУ в Республике Коми, где сосняки испытывают существенную антропогенную нагрузку.

Обращает на себя внимание более высокая, чем у большого соснового лубоеда, встречаемость малого соснового лубоеда. Большой сосновый лубоед обычно первым заселяет деревья, осваивая зону толстой коры и обеспечивая возможность поселения малого соснового лубоеда, усачей и других вредителей, лёт которых происходит позже. В данном случае, при низкой плотности популяций этих видов, заселяются отстающие в росте сильно ослабленные деревья с признаками развития грибных заболеваний, в особенности опенка *Armillaria* spp. Это с одной стороны создаёт неблагоприятные условия для развития большого соснового лубоеда (луб в нижней части ствола теряет питательные свойства), а с другой – обеспечивает возможность заселения менее агрессивного малого соснового лубоеда в связи с низкой смолопродуктивностью.

Иная ситуация наблюдается с язвенным раком. В северотаёжных еловых лесах это весьма распространённое заболевание, значение которого недооценено [Селиховкин и др., 2016; Варенцова и др., 2017; Шабунин и др., 2023; Vasiliauskas et al., 1996]. При обследовании было отмечено два типа заболевания – образование язв непосредственно на коре и формирование язв на месте отмерших или отмирающих сучков. В данной работе учитывались только открытые язвы на коре. Доля деревьев с наличием открытых язв сильно варьировала на разных ППУ, и какой-либо зависимости встречаемости этого заболевания от географического положения ППУ и характеристик древостоя не было отмечено. При этом существует достоверная положительная корреляционная связь поражаемости язвенным раком с ухудшением состояния древостоя вне зависимости от географического расположения ППУ (рис. 3, табл. 5). Ранее нами было показано значение язвенного рака для ельников Ленинградской области [Селиховкин и др., 2017, 2018а, 2018б; Варенцова и др., 2023]. Исключив данные ППУ, которые попали в зону возникших очагов стволовых вредителей (короеда-типографа) и патогенных организмов (опёнок), мы получили фоновую активность вредителей и патогенов. Единственный существенный биологический фактор, ухудшающий состояние древостоев – язвенный рак ели. При этом его активность не зависит от широтного положения древостоев.

Тем не менее влияние климатических и погодных факторов исключать нельзя. Если они не оказывают существенного прямого влияния на состояние древостоев на исследованных объектах, то бесспорно оказывают положительное воздействие на развитие некоторых вредителей, увеличивая их численность. Этот вопрос был нами рассмотрен в нескольких работах [Селиховкин и др., 2022, 2023а, б]. Кроме того, меняется состав энтомокомплексов. Начинают доминировать «южные» виды с большими требованиями к теплообеспеченности развития [Селиховкин, 2024]. В связи с некоторым потеплением климата в Ленинградской области и Карелии (в Мурманской области этот процесс идёт гораздо медленнее) можно ожидать возрастание вспышечной активности стволовых вредителей. Прямого влияния климатических изменений на состояние древостоев вряд ли можно ожидать в ближайшее десятилетие.

Повторные обследования ППУ позволят нам получить данные не только о пространственной, но и о временной динамике состояния древостоев и комплексов вредителей.

Заключение. В целом, можно утверждать, что влияние теплообеспеченности на состояние древостоев не является ведущим фактором, но может проявляться опосредованно, через увеличение активности вредителей.

Наиболее распространённое заболевание хвойных Ленинградской области, республик Карелия и Коми и Мурманской области – язвенный рак ели. Оно оказывает значимое влияние на состояние древостоев во всех рассмотренных регионах вне зависимости от их широтного расположения.

При отсутствии очагов массового размножения вредителей и развития болезней патогены и насекомые-дендрофаги не оказывают существенного воздействия на состояние древостоев.

Сведения о финансировании исследования. Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 24-16-00092 «Взаимосвязи насекомых-вредителей и патогенных организмов и ответные реакции древесных растений северо-запада европейской части России: мониторинг и методы контроля плотности популяций вредителей и патогенов».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Варенцова Е.Ю., Мамаев Н.А., Мартирова М.Б. Фитопатологическое состояние сосны и ели в древостоях Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 244. С. 131–149. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.244.131-149. EDN: UFDICIA.

Варенцова Е.Ю., Седихин Н.В., Селиховкин А.В. Раневой рак ели и особенности его развития // Леса России: политика, промышленность, наука, образование : матер. Второй Междунар. науч.-технич. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2017. Т. 2. С. 307.

Гречкин В.П. Лесопатологическая характеристика лесов СССР по отдельным природно-географическим зонам. Т. 1. Лесопатологическая характеристика лесов лесной зоны. Пушкино: ВНИИЛМ, 2019. 308 с.

Катаев О.А., Осетров А.В., Поповичев Б.Г., Селиховкин А.В. Динамика плотности популяций короедов (Coleoptera, Scolytidae) в древостоях, ослабленных природными и антропогенными факторами // Чтения памяти Николая Александровича Холодковского. СПб.: Русское энтомологическое общество, 2001. Вып. 54. 82 с.

Катаев О.А., Поповичев Б.Г. Лесопатологические обследования для изучения стволовых насекомых в хвойных древостоях: учеб. пособие. СПб.: СПбЛТА, 2001. 72 с.

Климат России / под ред. д-ра геогр. наук, проф. Н.В. Кобышевой. СПб: Гидрометеиздат, 2001. 656 с.

Князева С.В., Эйдлина С.П. Картографическая оценка динамики показателей состояния древесных растений северо-западных регионов России // Вопросы

лесной науки. 2018. Т. 1. № 1. С. 1–33. DOI: 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-33. EDN: SOVJMP.

Концепция интенсивного использования и воспроизводства лесов. СПб.: ФБУ «СПБНИИЛХ», 2015. 16 с.

Лесной план Мурманской области на 2019–2028 гг. Утвержден постановлением Губернатора Мурманской области от 20.03.2019 № 29-ПГ.

Лесной план Республики Карелия на 2019–2028 гг. Приложение к распоряжению Главы Республики Карелия от 30 декабря 2020 г. № 814-р.

Мандельштам М.Ю., Селиховкин А.В. Короеды северо-запада России (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae): история изучения, состав и генезис фауны // Энтомологическое обозрение. 2020. Т. 99. № 3. С. 631–665. DOI: 10.31857/S0367144520030119

Мартирова М.Б., Мамаев Н.А. Использование методов международной программы ICP-Forest в мониторинге всплеск массового размножения короеда-типографа *Ips typographus* на территории Ленинградской области // Дендробионтные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах: 100 лет со дня рождения О.А. Катаева. XIII Чтения памяти О.А. Катаева. 28.10-01.11. 2024 г. Санкт-Петербург / под ред. А.В. Селиховкина, Ю.Н. Баранчикова, Н.Н. Карпуна, В.И. Пономарёва (в печати).

Маслов А.Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов. Пушкино: ВНИИЛМ, 2010. 138 с.

Методика организации и проведения работ по мониторингу лесов европейской части России по программе ICP-Forest (методика ЕЭК ООН). Федеральная служба лесного хозяйства России, Инструкция от 21 февраля 1995 года.

Мозолевская Е.Г., Катаев О.А., Соколова Э.С. Методы лесопатологического обследования очагов стволовых вредителей и болезней леса. М.: Лесн. пром-сть, 1984. 152 с.

Обзор санитарного и лесопатологического состояния земель лесного фонда за 2007 год. № 46/47 24-30 ноября 2008 г. Российский центр защиты леса: Пушкино, 2008. 16 с.

Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Мурманской области за 2019 год и прогноз на 2020 год / под ред. В.В. Ященко. Филиал ФБУ «Рослесозащита». ЦЗЛ Ленинградской области. СПб., 2020б. 129 с.

Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Мурманской области за 2021 год. СПб., 2022. 117 с.

Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Республики Карелия за 2019 год и прогноз на 2020 год / под ред. И.А. Шарова. Филиал ФБУ «Рослесозащита». ЦЗЛ Ленинградской области. Петрозаводск, 2020а. 143 с.

Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Республики Коми за 2020 год. Сыктывкар: Центр защиты леса Республики Коми, филиал ФБУ «Рослесозащита», 2021. 95 с.

Огибин Б.И., Лобанова А.В. Влияние усачей рода *Monochamus* на деревья и лесоматериалы // Материалы отчётной сессии по итогам научно-исследовательских работ за 1989 год. Госкомитет СССР по лесу, Архангельский институт леса и лесохимии: Архангельск, 1990. С. 89–71.

Огибин Б.И. Насекомые-ксилофаги лесов Европейского Севера и борьба с ними. Архангельск: Архангельский институт леса и лесохимии, 1989. 28 с.

Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород Европейского Севера России // Лесной журнал. 2022. № 2. С. 9–25.

Селиховкин А.В. Вредители и патогены древесных растений в насаждениях Санкт-Петербурга: динамика и прогноз // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023а. № 243. С. 162–176. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.162-176

Селиховкин А.В. Нормативно-правовая база лесозащиты и её результативность в регуляции плотности популяций вредителей в таёжных лесах // Сибирский лесной журнал. 2023б. № 1. С. 29–42. DOI: 10.15372/SJFS20230104

Селиховкин А.В. Потепление климата и размножение вредителей в насаждениях европейской части России // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: матер. Девятой Междунар. науч.-технич. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2024 (в печати).

Селиховкин А.В., Ахматович Н.А., Варенцова Е.Ю., Поповичев Б.Г. Размножение короёда-типографа и других дендропатогенных организмов на Карельском перешейке // Лесоведение. 2018а. № 6. С. 426–433.

Селиховкин А.В., Варенцова Е.Ю., Поповичев Б.Г. Сплошные санитарные рубки как метод контроля плотности популяций стволовых вредителей и распространения дендропатогенных организмов в современных условиях на примере Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2017. Вып. 220. С. 186–199.

Селиховкин А.В., Варенцова Е.Ю., Поповичев Б.Г., Мусолин Д.Л. Дендропатогенные грибы и стволовые вредители как фактор разрушения лесных экосистем Карельского перешейка // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: матер. Третьей Междунар. науч.-технич. конф. СПб.: СПбГЛТУ, 2018б. Т. 1. С. 254–256.

Селиховкин А.В., Глебов Р.Н., Магдеев Н.Г., Ахматович Н.А., Поповичев Б.Г. Оценка роли насекомых и дендропатогенных организмов в усыхании древостоев Ленинградской области и Республики Татарстан // Лесоведение. 2016. № 2. С. 83–95.

Селиховкин А.В., Гниненко Ю.И. Вспышки массового размножения вредителей ассимиляционного аппарата древесных растений на северо-западе европейской части России // Лесоведение. 2023. № 2. С. 102–115.

Селиховкин А.В., Мамаев Н.А., Мартирова М.Б., Меркурьев А.С., Поповичев Б.Г. Новая вспышка массового размножения короёда-типографа в Ленинградской области и её особенности // Энтомологическое обозрение. 2022. № 2. С. 239–251.

Селиховкин А.В., Поповичев Б.Г., Мандельштам М.Ю., Алексеев А.С. Роль стволовых вредителей в изменении состояния хвойных лесов на северо-западе европейской части России // Лесоведение. 2023а. № 3. С. 304–321. DOI: 10.31857/S0024114823020080

Селиховкин А.В., Поповичев Б.Г., Осечкина Т.А., Мамаев Н.А., Мартирова М.Б. Динамика состояния популяции короёда-типографа в Ленинградской области в очаге массового размножения // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023б. Вып. 244. С. 184–199. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.184-199.

Шабунин Д.А., Варенцова Е.Ю., Поповичев Б.Г., Селиховкин А.В. Новые данные о видовом составе грибов язвенного рака стволов ели // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 244. С. 118–130. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.244.118-130

Alekseev A.S. Assessment and Inventory of Forest Ecosystems Biodiversity: Case Study for Karelian Isthmus of Leningrad Region, Russia // Open Journal of Ecology. 2018. Vol. 8, no. 5. P. 305–323. DOI: 10.4236/oje.2018.85019

Battisti A., Larsson S. Climate Change and Forest Insect Pests // Forest Entomology and Pathology. Vol. 1: Entomology / Allison J.D., Paine T.D. Slippers B., Wingfield M.J., eds. Switzerland: Springer, 2023. P. 773–787.

Battisti A., Larsson S. Climate change and insect pest distribution range // Climate change and insect pests. CABI International, 2015. P. 1–15.

Büntgen U., Liebhold A., Nievergelt D., Wermelinger B., Roques A., Reinig F., Krusic P.J., Piermattei A., Egli S., Cherubini P., Esper J. Return of the moth: rethinking the effect of climate on insect outbreaks // Oecologia. 2020. No. 192. P. 543–552 DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-019-04585-9>

Hof A.R., Svahlin A. The potential effect of climate change on the geographical distribution of insect pest species in the Swedish boreal forests // Scandinavian Journal of Forest Research. 2016. Vol. 31(1). P. 29–39. DOI: 10.1080/02827581.2015.105275

Ivantsova E.D., Pyzheva F.I., Zander E.V. Economic Consequences of Insect Pests Outbreaks in Boreal Forests // Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences. 2019. Vol. 12 (4). P. 627–642.

Kelly M. Adaptation to Climate Change through Genetic Accommodation and Assimilation of Plastic Phenotypes // Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences. 2019. Vol. 374, iss. 1768, art. 20180176. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0176>

Komonen A., Schroeder L.M., Weslien J. *Ips typographus* population development after a severe storm in a nature reserve in southern Sweden // Journal of Applied Entomology. 2011. Vol. 135 (1–2). P. 132–141.

Lehmann Ph., Ammunét T., Barton M., Battisti A., Eigenbrode S.D., Jepsen J.U., Kalinkat G.S., Niemelä P., Terblanche J.S., Økland B., Björkman C. Complex responses of global insect pests to climate warming // Front. Ecol. Environ. 2020. Vol. 18(3). P. 141–150. DOI: 10.1002/fee.2160

Öhrn P. The spruce bark beetle *Ips typographus* in a changing climate – Effects of weather conditions on the biology of *Ips typographus* // Introductory Research Essay. No. 18. Dept. of Ecology, SLU, Uppsala, 2012. 27 p.

Tenow O. Discovery of continental-scale travelling waves and lagged synchrony in geometrid moth outbreaks prompt a re-evaluation of mountain birch/geometrid studies? [version 2; peer review: 2 approved]. F1000Research 2013, 2:128. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.2-128.v2>

Thom D., Rammer W., Seidl R. The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes // Ecological Monographs. 2017. Vol. 87 (4). P. 665–684. DOI: 10.1002/ecm.1272.

Vasiliaskas R., Stenlid J., Johansson M. Fungi in bark peeling wounds of *Picea abies* in Central Sweden // European Journal of Forest Pathology. 1996. Vol. 26. P. 285–296. DOI: 10.1111/j.1439-0329.1998.tb01192.x.

References

Alekseev A.S. Assessment and Inventory of Forest Ecosystems Biodiversity: Case Study for Karelian Isthmus of Leningrad Region, Russia. *Open Journal of Ecology*, 2018, vol. 8, no. 5, pp. 305–323. DOI: 10.4236/oje.2018.85019

Battisti A., Larsson S. Climate Change and Forest Insect Pests. *Forest Entomology and Pathology*. Vol. 1: Entomology / Allison J.D., Paine T.D. Slippers B., Wingfield M.J., eds. Switzerland: Springer, 2023, pp. 773–787.

Battisti A., Larsson S. Climate change and insect pest distribution range. *Climate change and insect pests*. CABI International, 2015, pp. 1–15.

Büntgen U., Liebholt A., Nievergelt D., Wermelinger B., Roques A., Reinig F., Krusic P.J., Piermattei A., Egli S., Cherubini P., Esper J. Return of the moth: rethinking the effect of climate on insect outbreaks. *Oecologia*, 2020, no. 192, pp. 543–552. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00442-019-04585-9>

Climate of Russia / edited by Dr. of Geogr. of Sciences, Prof. N.V. Kobysheva. SPb: Gidrometeoizdat, 2001. 656 p. (In Russ.)

Forest Plan of the Murmansk Oblast for 2019–2028. Approved by the decree of the Governor of the Murmansk region dated 20.03.2019 no. 29-PG. (In Russ.)

Forest Plan of the Republic of Karelia for 2019–2028. Annex to the order of the Head of the Republic of Karelia from December 30, 2020 № 814-r. (In Russ.)

Grechkin V.P. Lesopathological characterization of forests of the USSR by separate natural-geographical zones. Vol. 1. Lesopathological characterization of forests of the forest zone. Pushkino: VNIILM, 2019. 308 p. (In Russ.)

Hof A.R., Svahlin A. The potential effect of climate change on the geographical distribution of insect pest species in the Swedish boreal forests. *Scandinavian Journal of Forest Research*, 2016, vol. 31(1), pp. 29–39. DOI: 10.1080/02827581.2015.105275

Ivantsova E.D., Pyzheva F.I., Zander E.V. Economic Consequences of Insect Pests Outbreaks in Boreal Forests: A Literature Review. *Journal of Siberian Federal University. Humanities & Social Sciences*, 2019, vol. 12 (4), pp. 627–642.

Kataev O.A., Osetrov A.V., Popovichev B.G., Selikhovkin A.V. Population density dynamics of bark beetles (Coleoptera, Scolytidae) in stands weakened by natural and anthropogenic factors. *Readings in memory of Nikolai Aleksandrovich Kholodkovsky*. SPb.: Russian Entomological Society, 2001, vol. 54. 82 p. (In Russ.)

Katayev O.A., Popovichev B.G. Lesopatologicheskie obsledovaniya dlya izucheniya stvolovykh nasekomykh v khvoynykh drevostoyakh (Forest pathological examination for the study of stem insects in coniferous stands): ucheb. posobiye. SPb.: SPbLTA, 2001. 72 p. (In Russ.)

Kelly M. Adaptation to Climate Change through Genetic Accommodation and Assimilation of Plastic Phenotypes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 2019, vol. 374, iss. 1768, art. 20180176. DOI: <https://doi.org/10.1098/rstb.2018.0176>

Knyazeva S.V., Eidlina S.P. Cartographic assessment of the dynamics of the state indicators of woody plants of the north-western regions of Russia. *Voprosy lesnoy nauki*, 2018, vol. 1, no. 1, pp. 1–33. DOI: 10.31509/2658-607X-2018-1-1-1-33. EDN: SOVJMP. (In Russ.)

Komonen A., Schroeder L.M., Weslien J. *Ips typographus* population development after a severe storm in a nature reserve in southern Sweden. *Journal of Applied Entomology*, 2011, vol. 135 (1–2), pp. 132–141.

Lehmann Ph., Ammunét T., Barton M., Battisti A., Eigenbrode S.D., Jepsen J.U., Kalinkat G.S., Niemelä P., Terblanche J.S., Økland B., Björkman C. Complex responses of global insect pests to climate warming. *Front. Ecol. Environ*, 2020, vol. 18(3), pp. 141–150. DOI: 10.1002/fee.2160

Mandelshtam M.Yu., Selikhovkin A.V. Bark and ambrosia beetles (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) of North-Western Russia: history of the study, composition and genesis of the fauna [Koroyedy severo-zapada Rossii (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae): istoriya izucheniya, sostav i genezis fauny]. *Entomological Review*, 2020, vol. 99, no. 3, pp. 631–665. (In Russ.)

Martirova M.B., Mamaev N.A. Use of methods of the international program ICP-Forest in monitoring outbreaks of mass reproduction of the bark beetle *Ips typographus* in the Leningrad region. *Dendrobiont invertebrate animals and fungi and their role in forest ecosystems: 100 years since the birth of O.A. Kataev. XIII Readings in memory of O.A. Kataev*. 28.10–01.11.2024, St. Petersburg / edited by A.V. Selikhovkin, Y.N. Baranchikov, N.N. Karpun, V.I. Ponomaryov (in press). (In Russ.)

Maslov A.D. Koroyed-tipograf i usykhanie yelovykh lesov. (Bark beetle-typographer and drying out of spruce forests). Pushkino: VNIILM, 2010. 138 p. (In Russ.)

Methodology for organizing and conducting ICP-Forest monitoring of forests in the European part of Russia (UNECE methodology). Federal Forestry Service of Russia, Instruction dated February 21, 1995. (In Russ.)

Mozolevskaya Ye.G., Katayev O.A., Sokolova E.S. Metody lesopatologicheskogo obsledovaniya ochagov stvolovykh vreditel' i bolezney lesa. (Methods of forest pathological examination of foci of stem pests and forest diseases). M.: Lesn. prom-st', 1984. 152 p. (In Russ.)

Ogibin B.I., Lobanova A.V. Influence of *Monochamus mustache* on trees and timber. *Materials of the reporting session on the results of research works for 1989*. USSR State Committee on Forests, Arkhangelsk Institute of Forest and Forest Chemistry: Arkhangelsk, 1990, pp. 89–71. (In Russ.)

Ogibin B.N. Insects-xylophages of forests of the European North and their control. Arkhangelsk: Arkhangelsk Institute of Forests and Forest Chemistry, 1989. 28 p. (In Russ.)

Öhrn P. The spruce bark beetle *Ips typographus* in a changing climate – Effects of weather conditions on the biology of *Ips typographus*. *Introductory Research Essay* No. 18. Dept. of Ecology, SLU, Uppsala, 2012. 27 p.

Prozherina N.A., Nakvasina E.N. Climate change and its impact on adaptation and intraspecific variability of conifers of the European North of Russia. *Lesovedenie*, 2022, no. 2, pp. 9–25. (In Russ.)

Review of sanitary and forest pathological condition of forest fund lands for 2007. No. 46/47 November 24–30, 2008. Russian Forest Protection Center: Pushkino, 2008. 16 p. (In Russ.)

Review of sanitary and forest pathological condition of forests of the Komi Republic for 2020. Syktyvkar: Forest Protection Center of the Komi Republic, branch of FBU «Roslesozaschita», 2021. 95 p. (In Russ.)

Review of the sanitary and forest pathological condition of the forests of the Murmansk region for 2019 and the forecast for 2020 / edited by V.V. Yashchenko. Yashchenko. Branch of FBU «Roslesozaschita». CZL of the Leningrad region. St. Petersburg, 2020b. 129 p. (In Russ.)

Review of sanitary and forest pathological condition of forests of the Murmansk region for 2021. St. Petersburg, 2022. 117 p. (In Russ.)

Review of sanitary and forest pathological condition of forests of the Republic of Karelia for 2019 and forecast for 2020 / edited by I.A. Sharov. Branch of FBU «Roslesozaschita». Central Forestry Center of the Leningrad region. Petrozavodsk, 2020a. 143 p. (In Russ.)

Selikhovkin A.V. Climate warming and pest reproduction in plantations of the European part of Russia. *Forests of Russia: politics, industry, science, education: Proceedings of the ninth international scientific and technical conference*. SPb.: SPbGLUE, 2024 (in press). (In Russ.)

Selikhovkin A.V. Normative-legal base of forest protection and its effectiveness in the regulation of pest population density in taiga forests. *Siberian Forest Journal*, 2023b, no. 1, pp. 29–42. DOI: 10.15372/SJFS20230104. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., Akhmatovich N.A., Varentsova E.Yu., Popovichev B.G. Regeneration of European Spruce Bark Beetle and Other Wood Pathogens in forests of

the Karelian Isthmus. *Russian Journal of Forest Science (Lesovedenie)*, 2018a, no. 6, pp. 426–433. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., Glebov R.N., Magdeev N.G., Akhmatovich N.A., Popovichev B.G. Assessment of the role of insects and dendropathogenic organisms in the desiccation of stands in the Leningrad region and the Republic of Tatarstan. *Forest Science*, 2016, no. 2, pp. 83–95. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., Gninenko Yu.I. Mass Reproduction Outbreaks of Phyllophagous Insects in Forests of the Northwest of European Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2023, vol. 16, no. 7, pp. 1007–1016. DOI: 10.31857/S0024114823020080. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., Mamaev N.A., Martirova M.B., Merkuriev A.S., Popovichev B.G. New outbreak of mass reproduction of the bark beetle *Typographus* in the Leningrad region and its characteristics. *Entomological Review*, 2022, no. 2, pp. 239–251. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., Popovichev B.G., Mandel'shtam M. Yu., Alekseyev A.S. The Role of the Stem Pests in Changing the Condition of Coniferous Forests of the North-West of the European Part of Russia. *Forest Science*, 2023a, no. 3, pp. 304–321. DOI: 10.31857/S0024114823020080. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., Popovichev B.G., Osechkina T.A., Mamaev N.A., Martirova M.B. Dynamics of the state of the bark beetle-tipograph population in the Leningrad region in the hotbed of mass reproduction. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2023b, iss. 244, pp. 184–199. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., Varentsova E.Yu., Popovichev B.G. Sanitary clearcuts as a method of controlling the density of stem pest populations and the spread of dendropathogenic organisms in modern conditions on the example of the Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2017, iss. 220, pp. 186–199. (In Russ.)

Selikhovkin A.V., Varentsova E.Yu., Popovichev B.G., Musolin D.L. Dendropathogenic fungi and stem pests as a factor of destruction of forest ecosystems of the Karelian Isthmus. *Forests of Russia: politics, industry, science, education: Proceedings of the third international scientific and technical conference*. SPb.: SPbGLTU, 2018b, vol. 1, pp. 254–256. (In Russ.)

Selikhovkin A.V. Pests and pathogens of woody plants in the plantations of St. Petersburg: dynamics and forecast. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2023a, iss. 243, pp. 162–176. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.243.162-176. (In Russ.)

Shabunin D.A., Varentsova E.Y., Popovichev B.G., Selikhovkin A.V. New data on the species composition of spruce trunk canker fungi. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2023, iss. 244, pp. 118–130. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.244.118-130. (In Russ.)

Tenow O. Discovery of continental-scale travelling waves and lagged synchrony in geometrid moth outbreaks prompt a re-evaluation of mountain birch/geometrid studies? [version 2; peer review: 2 approved]. *F1000Research* 2013, 2:128. DOI: <https://doi.org/10.12688/f1000research.2-128.v2>

The concept of intensive use and reproduction of forests. SPb.: FBU «SPbNIILKh», 2015. 16 p. (In Russ.)

Thom D., Rammer W., Seidl R. The impact of future forest dynamics on climate: interactive effects of changing vegetation and disturbance regimes. *Ecological Monographs*, 2017, vol. 87 (4), pp. 665–684. DOI: 10.1002/ecm.1272

Varentsova E.Yu., Mamaev N.A., Martirova M.B. Phytopathological condition of pine and spruce in stands in the Leningrad region. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 244, pp. 131–149. DOI: 10.21266/2079-4304.2023.244.131-149. EDN: UFDCIA. (In Russ.)

Varentsova E.Yu., Sedikhin N.V., Selikhovkin A.V. Spruce wound cancer and features of its development. *Forests of Russia: politics, industry, science, education* : mater. Second International scientific and technical conf. SPb.: SPbSFTU, 2017, vol. 2, p. 307. (In Russ.)

Vasiliauskas R., Stenlid J., Johansson M. Fungi in bark peeling wounds of Picea abies in Central Sweden. *European Journal of Forest Pathology*, 1996, vol. 26, pp. 285–296. DOI: 10.1111/j.1439-0329.1998.tb01192.x

Материал поступил в редакцию 16.06.2024

Мартирова М.Б., Мамаев Н.А., Варенцова Е.Ю., Поповичев Б.Г., Пахучий В.В., Пахучая Л.М., Селиховкин А.В. Пространственная динамика состояния и комплексов болезней и вредителей таёжных лесов северо-запада европейской части России // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 17–44. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.17-44

Исследование взаимосвязи состояния древостоев и активности вредителей и патогенов проведено в 2021–2022 гг. на основе созданной сети пробных площадей в хвойных лесах северо-запада европейской части России, включающей 157 пунктов постоянного учёта (ППУ) в северной и южной части Ленинградской области, центральной и северной Карелии, на юге Мурманской области и в Республике Коми. Все ППУ располагались в спелых и перестойных древостоях с преобладанием ели или сосны. Состояние еловых древостоев на ППУ по мере продвижения к северу варьирует незначительно, а состояние сосновых насаждений несколько ухудшается. Данные четырёх ППУ были исключены из рассмотрения, так как резкое ухудшение состояния древостоев было связано с локальным воздействием вспышки массового размножения короеда-типографа. Анализ остального массива данных показал отсутствие связи средней категории состояния и встречаемости вредителей и патогенов, за исключением язвенного рака ели – наиболее распространённого заболевания в исследуемых регионах. Ухудшение состояния еловых древостоев имеет положительную корреляционную связь с этим заболеванием вне зависимости от их широтного расположения. В сосновых древостоях преобладали некрозно-раковые заболевания (преимущественно рак-серянка), а также ажурность кроны. Сосновая губка

Porodaedalea pini встречалась единично во всех группах ППУ, за исключением Мурманской области. В сосновых древостоях на ППУ в Карелии довольно часто встречались корневые и комлевые гнили. Во всех регионах отмечался опёнок *Armillaria* spp. Типичные для северотаёжных европейских лесов виды и группы видов стволовых вредителей встречались во всех группах ППУ. Влияние теплообеспеченности на состояние древостоев не является ведущим фактором, но может проявляться опосредованно через увеличение активности вредителей. При отсутствии очагов массового размножения вредителей и развития болезней патогены и вредители не оказывают существенного воздействия на состояние древостоев, за исключением язвенного рака.

Ключевые слова: хвойные леса, состояние, насекомые-вредители, язвенный рак.

Martirova M.B., Mamaev N.A., Varentsova E.Yu., Popovichev B.G., Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M., Selikhovkin A.V. Spatial dynamics of the state and complexes of diseases and pests of taiga forests in the north-west of the European part of Russia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 17–44 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.17-44

A 2021–2022 study investigated the relationship between forest stands and pests and pathogens in coniferous forests in the north-west of Europe, Russia. The study involved 157 observation plots (PPUs) in mature and overmature forest stands, predominantly spruce or pine. The condition of spruce stands varies insignificantly as one moves north, while pine stands deteriorate somewhat. Four PPUs were excluded due to a sharp deterioration caused by an outbreak of the European bark beetle. The data showed no connection between average condition and pests and pathogens, except for spruce canker, the most common disease in the studied regions. A positive correlation was found between spruce stand condition and this disease. In pine forests, necrosis-canker diseases and crown openness predominated. The pine conk *Porodaedalea pini* was found sporadically in all PPU groups, with the exception of the Murmansk region. *Armillaria* spp. and species and groups of bark beetles and wood borer pests typical of northern taiga European forests were found in all PPU groups. Heat supply's influence on tree stand condition is not a leading factor, but can indirectly increase pest activity. In the absence of mass reproduction and disease development, pathogens and pests do not significantly impact tree stand condition, except for canker.

Key words: coniferous forests, condition, north-west Russia, pests, diseases.

МАРТИРОВА Мария Борисовна – аспирант, ассистент кафедры защиты леса, лесовоснования и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 8636-2548. ORCID: 0000-0002-8576-5226.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: masha2340350@yandex.ru

MARTIROVA Maria B. – PhD student, Assistant of the Department of Forest Protection, Wood Science and Game Science, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8636-2548. ORCID: 0000-0002-8576-5226.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: masha2340350@yandex.ru

МАМАЕВ Никита Андреевич – аспирант, ассистент кафедры защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 4514-5901. ORCID: 0000-0003-2797-6348.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mamaevld@bk.ru

МАМАЕВ Nikita A. – PhD student, Assistant of the Department of Forest Protection, Wood Science and Game Science, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4514-5901. ORCID: 0000-0003-2797-6348.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: mamaevld@bk.ru

ВАРЕНЦОВА Елена Юрьевна – заведующий кафедрой защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доцент, кандидат биологических наук. SPIN-код: 9300-4162. ORCID: 0000-0002-4616-2289.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: varentsova.elena@mail.ru

VARENTSOVA Elena Y. – PhD (Biological), Head of the Department of Forest Protection, Wood Science and Game Science, Associate Professor, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 9300-4162. ORCID: 0000-0002-4616-2289.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: varentsova.elena@mail.ru

ПОПОВИЧЕВ Борис Георгиевич – доцент кафедры защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат биологических наук. SPIN-код: 3319-7177. ORCID: 0009-0008-9211-6030.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: b.g.popovichev@yandex.ru

POPOVICHEV Boris G. – PhD (Biological), Associate Professor of the Department of Forest Protection, Wood Science and Game Science, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 3319-7177. ORCID: 0009-0008-9211-6030.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: b.g.popovichev@yandex.ru

ПАХУЧИЙ Владимир Васильевич – заведующий кафедрой лесного хозяйства и деревообработки Сыктывкарского лесного института, профессор, доктор сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 3300-2306.

167982, ул. Ленина, д. 39, г. Сыктывкар, Россия. E-mail: pakhutchy@rambler.ru

PAKHUCHIY Vladimir V. – DSc (Agricultural), Head of the Department of Forestry and Woodworking, Syktyvkar Forestry Institute, Professor. SPIN-code: 3300-2306.

167982, Lenina str. 39, Syktyvkar, Russia. E-mail: pakhutchy@rambler.ru

ПАХУЧАЯ Людмила Михайловна – доцент кафедры лесного хозяйства и лесопромышленных технологий Сыктывкарского лесного института, кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 4911-7466.

167982, ул. Ленина, д. 39, г. Сыктывкар, Россия. E-mail: pakhutchy@rambler.ru

PAKHUCHAYA Ludmila M. – PhD (Agricultural), Associate Professor of the Department of Forestry and Forest Industry Technologies, Syktyvkar Forestry Institute. SPIN-code: 4911-7466.

167982, Lenina str. 39, Syktyvkar, Russia. E-mail: pakhutchy@rambler.ru

СЕЛИХОВКИН Андрей Витимович – профессор кафедры защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук. SPIN-код: 9339-4978. ORCID: 0000-0003-4227-9647.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.selikhovkin@mail.ru

SELIKHOVKIN Andrei V. – DSc (Biological), Professor of the Department of Forest Protection, Wood Science and Game Science, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 9339-4978. ORCID: 0000-0003-4227-9647.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: a.selikhovkin@mail.ru

**Н.Р. Сунгурова, С.Р. Страздаускене, Г.Н. Стругова, С.С. Макаров,
С.Е. Страздаускас**

ЛАНДШАФТНАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ ТЕРРИТОРИИ СПОРТИВНЫХ СООРУЖЕНИЙ В Г. АРХАНГЕЛЬСКЕ

Введение. Одним из средств воспитания всесторонне развитого человека всегда были физкультура и спорт. Активный отдых – надежно установившийся тренд в современном мире. Именно спортивные зоны, располагаемые в жилых микрорайонах, дают возможность популяризировать здоровый образ жизни [Давыдова, Кузнецова, 2017].

Архитектурно-планировочные решения спортивных парков зависят от их целевой направленности, природно-климатических условий, номенклатуры сооружений. Последняя, в свою очередь, должна удовлетворять разнообразным потребностям различных категорий посетителей в соответствии с их физической подготовкой, возрастом и стремлением к занятиям по определенным видам спорта [Кандр, 2017].

Ландшафтный дизайн, включающий в себя посадку древесных растений, а также устройство клумб на территории спортивных комплексов и вокруг них, улучшает их визуальное восприятие и демонстрирует уважительное отношение к окружающей среде [Березко, Соколинская, 2008].

Все более значимой в оздоровлении воздушных бассейнов города и окружающей среды становится роль зеленых насаждений. Урбанофлора участвует в формировании микроклимата отдельных районов населенных мест и города в целом, влияя на тепловой, водный и ветровой режимы, а также выполняя санитарно-гигиеническую функцию.

При подборе ассортимента растений для озеленения спортивного комплекса необходимо, чтобы они в течение продолжительного времени могли выдержать постоянный контакт [Теодоронский и др., 2008; Charra-Vaskou et al., 2012]. Растения с сильным ярким ароматом лучше размещать на участках, хорошо продуваемых ветром. Посадка ядовитых растений, с множеством мелких семян, засоряющих спортивные площадки и дорожки, абсолютно запрещена. Существуют растения, которые могут вызвать неприятные последствия после контакта с открытыми участками кожного покрова [Гостев, Юскевич, 1991].

Зеленые насаждения способствуют созданию биологического и психологического комфорта человека. Они оздоравливают и усиливают ионизацию воздуха, выделяя листьями и цветами фитонциды, увеличивают содержание в нем озона, особенно хвойные породы. Благодаря большой испаряющей поверхности листовой массы зеленые насаждения увеличивают влажность воздуха.

Зеленые насаждения декоративны, их силуэт и форма, окраска, а кроме того, и аромат влияют на эмоциональное состояние человека. Профессиональное сочетание растений с различной формой и продуманной цветовой гаммой в группах, массивах и солитерах благотворно действует на психику занимающегося спортом населения [Горохов, 2005]. Следовательно, развитие спортивной инфраструктуры, ее обновление и благоустройство имеют большую значимость и актуальность.

Цель исследований – изучить ландшафтную организацию территории спортивных сооружений в г. Архангельске, проверить ее на соответствие нормативным документам и предложить мероприятия по ее улучшению.

Материалы и методика исследований. Экологические факторы и природно-климатические условия г. Архангельска оказывают влияние на подбор растительного ассортимента. Чаще всего внимание обращается на особенности воздушной среды.

Климат Архангельска формируется в условиях малого количества солнечной радиации зимой, под влиянием северных морей и интенсивного западного переноса, обеспечивающего вынос влажных морских масс воздуха с Атлантического океана (летом – холодного, зимой – теплого). Особенность климата – частая смена воздушных масс. Средняя температура января составляет $-12,8^{\circ}\text{C}$, июля – $+16,3^{\circ}\text{C}$, среднегодовая температура – $+1,3^{\circ}\text{C}$. Погода в Архангельске непостоянная и может меняться несколько раз за день. Дождливых дней в году выпадает намного больше, чем солнечных [Общая..., 2024].

Основными местами занятия спортом на улице, организованными как отдельные объекты, в городе Архангельске считаются спортивные комплексы: «Труд», «Динамо», «Буревестник», «Волна», физкультурно-спортивный комплекс им. А.Ф. Личутина и лыжный стадион им. В.С. Кузина. Эти объекты отличаются размером, состоянием покрытий спортивных полей, площадок и дорожек, наличием необходимого инвентаря и специального оборудования, удаленностью от центра города. Ниже приведем краткую характеристику спортивных объектов.

Стадион «Волна» расположен в Соломбальском округе вдоль Никольского проспекта. На территории есть спортивные и тренажерные залы, футбольное поле и волейбольная сетка. Зимой территория используется в качестве катка. Зеленые насаждения представлены единичными посадками осины (*Populus tremula* L.), березы повислой (*Betula pendula* Roth) и тополем бальзамическим (*Populus balsamifera* L.) по периметру вдоль ограды. Цветочное оформление отсутствует.

Стадион «Труд» расположен в Октябрьском округе и является самым крупным многофункциональным спортивным сооружением в городе. На территории размещена ледовая арена с искусственным льдом, трибуны на 10000 зрителей, открытые и крытые теннисные корты, легкоатлетический манеж, роллердром, плавательный бассейн, волейбольная площадка. Зеленые насаждения размещены по периметру территории вдоль ограды и представлены тополем бальзамическим, березами повислой и пушистой (*B. pubescens* Ehrh.), лиственницей сибирской (*Larix sibirica* Ledeb.), ивой пятитычинковой (*Salix pentandra* L.). Цветочное оформление отсутствует.

Стадион «Динамо» расположен в Ломоносовском округе. Спортивный комплекс со всех сторон окружен оживленными автомобильными дорогами. Территорию можно условно разделить на 3 основные части: главное поле с беговой дорожкой вокруг; комплекс спортивных площадок для игры в волейбол, баскетбол, настольный теннис и мини-футбол; крытый теннисный корт, зоны для прыжков в длину и роллердром. Зимой беговые дорожки используются для конькобежного спорта. Дендрофлору составляют береза повислая и тополь бальзамический. Цветочное оформление отсутствует.

Стадион «Буревестник», расположенный также в Ломоносовском округе, принадлежит Северному (Арктическому) федеральному университету имени М.В. Ломоносова (САФУ). Спортивный комплекс включает 6-8 футбольных ворот на главном поле, вокруг которого расположена беговая дорожка с современным мягким покрытием. Длина по внутренней стороне – 405 м, по внешней – 440 м. Также имеется площадка с турниками. Видовой ассортимент деревьев и кустарников представлен осинкой, березой повислой, ивами пятитычинковой и козьей (*S. caprea* L.), дёреном белым (*Cornus alba* L.), сиренью венгерской (*Syringa josikaea* J.Jacq. ex Reichenb.), черёмухой обыкновенной (*Padus avium* Mill.). Цветочное оформление отсутствует.

Физкультурно-спортивный комплекс имени А.Ф. Личутина расположен в Северном округе. На территории комплекса имеется бассейн, многофункциональный большой спортивный зал, залы для настольного тенниса и аэробики, тренажерный зал, футбольное поле с искусственным

покрытием, беговые дорожки, сектора для прыжков в длину, прыжков в длину с шестом, метания ядра и молота, хоккейная коробка, корты для бадминтона, волейбола и тенниса. В зимний период ФСК им. А.Ф. Личутина содержит лыжные трассы 1 и 3 км и ледовую площадку размером около 2000 кв.м., расположенную на прилегающей территории. Зеленые насаждения представлены лиственницей сибирской, березами повислой и пушистой, ивами трех- (*S. triandra* L.) и пятитычинковой, тополем бальзамическим и осиной. Вход в комплекс оформлен цветниками из летников.

Лыжный стадион им. В.С. Кузина расположен в Приморском районе в 24 км от г. Архангельска в деревне Малые Карелы. Лыжные трассы разной протяженности и сложности проложены в естественном лесном ландшафте, что создает дух единения человека и природы.

При обследовании территории спортивных комплексов проводили три вида оценки зеленых насаждений: дендрологическую, биоэкологическую и эстетическую (или ландшафтно-архитектурную) [Теодоронский, 2008; Травникова, 2011; Сунгурова и др., 2023].

При дендрологической оценке определяли видовое название растения, его жизненную форму.

В процессе биоэкологической оценки определяли общее состояние растения: *отличное* и *хорошее* присваивалось растениям, характеризующимся высокой зимостойкостью, нормальным облиствением, цветением, плодоношением, отсутствием сухих ветвей, сочной окраской листвы, а также правильной естественной формой; *удовлетворительное* фиксировалось у растений с небольшим количеством сухих побегов, замедленным ростом, слабым цветением, мелкой листвой; *плохое* отмечалось у растений с наличием сухих и усыхающих ветвей, полным отсутствием цветения, плохим облиствением, слабой зимостойкостью, с наличием повреждений вредителями и болезнями.

Эстетические качества внешних признаков растений определяли по показателю декоративности [Залывская, Бабич, 2020]. К таким признакам относятся высота растений, форма ствола, ветвей и их соотношение между собой, характер облиствения, форма и окраска листьев, цветков, плодов, сезонная декоративность, возрастная изменчивость, архитектоника кроны. При этом использовали 4-балльную систему оценки: *4 балла* присваивали растениям, отличающимся хорошим приростом, развитием и формой кроны, оригинальностью её строения, яркой и сочной окраской листьев и цветков, благоприятным эмоциональным воздействием; *3 балла* отмечали у растений, сохранивших свой габитус, находящихся в хорошем состоянии, имеющих хорошо сформированный ствол и ветви кроны; *2 балла* давали

растениям с заметным угнетением в росте и развитии, крона и ствол которых деформированы (морозобоины, дупла), имеются сухие ветви и побеги; 1 балл доставался сильно угнетённым растениям, ветви которых усыхают на 60-70%, крона сильно деформирована, ствол сильно повреждён. Растения не могут восстановить свою жизнедеятельность и должны быть удалены.

Результаты исследований. При обследовании территорий спортивных комплексов в г. Архангельске установлено, что дендрофлора представлена всего 11 видами деревьев и кустарников (табл. 1). 8 пород являются аборигенными, а 3 – интродуцентами. Класс Хвойные представляет только лиственница сибирская, которая к тому же является листопадной породой, что в зимний период несомненно подчеркивает суровость северного климата. Из красивоцветущих декоративных видов присутствуют дёрн белый и сирень венгерская, которые, к сожалению, произрастают на территории только одного объекта. Наиболее распространены березы и тополь бальзамический, что отражает картину озеленения объектов ландшафтной архитектуры в г. Архангельске в целом.

Очевидно, что имеющийся ассортимент древесно-кустарниковой растительности на территории спортивных объектов г. Архангельска очень скуден, а экологическая емкость окружающих комплексы ландшафтов не обеспечивает общегигиенических и спортивно-технологических функциональных требований к окружающей среде. Так, на стадионах «Волна», «Труд», «Динамо» озеленение представлено лишь единичными отдельно стоящими особями березы, тополя и ивы. Одной из причин такого «благоустройства» является, на наш взгляд, наряду с недостаточным финансированием и нехваткой высококвалифицированных специалистов-интродукторов, отсутствие специализированных питомников по выращиванию посадочного материала аллейных растений. Хотя по данным Н.А. Бабича с соавторами [2021] в Архангельской агломерации на территории городских объектов ландшафтной архитектуры определен следующий количественный состав деревьев и кустарников – 20 и 33 вида соответственно.

В то же время немаловажным фактором приобщения населения к здоровому образу жизни является профессионально спроектированная и грамотно организованная система озелененных территорий спортивных объектов, которая создает здоровое природное окружение для жителей городов [Быстрова и др., 2017]. Следовательно, необходимо создание современной спортивной рекреационной среды, способствующей здоровому образу жизни жителей Архангельска.

Таблица 1

**Ассортимент древесно-кустарниковой растительности
обследуемых спортивных сооружений**

Assortment of woody and shrubby vegetation of the surveyed sports facilities

№ п/п	Название вида	Стадион «Волна»	ФСК им. А.Ф. Ли- чутина	Стадион «Труд»	Стадион «Динамо»	Стадион «Буре- вестник»
1	Береза пушистая <i>Betula pubescens</i> Ehrh.	+	+	+		
2	Береза повислая <i>Betula pendula</i> Roth.	+	+	+	+	+
3	Тополь бальзамический <i>Populus balsamifera</i> L.	+	+	+	+	
4	Лиственница сибирская <i>Larix sibirica</i> Ledeb.		+	+		
5	Ива пятитычинковая <i>Salix pentandra</i> L.		+	+		+
6	Ива трехтычинковая <i>Salix triandra</i> L.		+			
7	Ива козья <i>Salix caprea</i> L.					+
8	Осина, или тополь дрожащий <i>Populus tremula</i> L.	+	+			+
9	Черемуха обыкновенная <i>Padus avium</i> Mill.					+
10	Дерен белый <i>Cornus alba</i> L.					+
11	Сирень венгерская <i>Syringa josikaea</i> J. Jacq. ex Reichenb.					+

Примечание: Полу жирным шрифтом выделены интродуцированные виды.

Рассмотрим ландшафтную организацию территории спортивных сооружений в границах г. Архангельска на примере стадиона «Буревестник».

Ландшафтная организация определяется особенностями архитектурно-планировочной структуры спортивных комплексов, а также особенностями функционального зонирования их территории. Площадки, предназначенные для различных видов спорта, размещены компактными группами рассредо-

точены по всей территории. Такая планировка направлена на создание участков, отличающихся устойчивостью и высокой декоративностью.

В ходе обследования территории стадиона площадью 1,6 га учтено 207 экземпляров древесно-кустарниковой растительности, в т.ч. 83 шт. деревьев (береза повислая, осина, черемуха обыкновенная, ива козья) и 124 шт. кустарников (сирень венгерская, ива трехтычинковая, дёрн белый). Процентное соотношение по породам представлено на рис. 1.

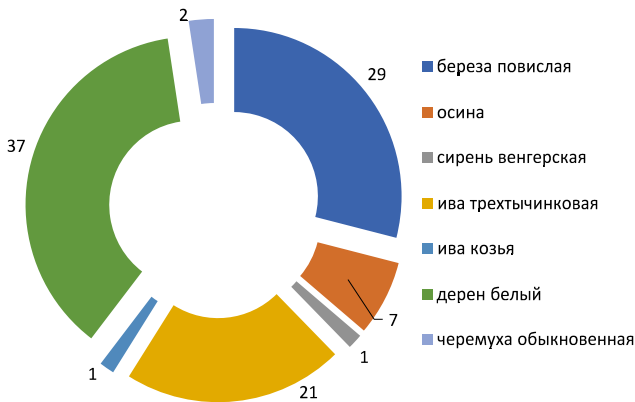


Рис. 1. Породный состав (%) древесно-кустарниковой растительности на территории стадиона «Буревестник»

Fig. 1. Species composition (%) of tree and shrub vegetation in the territory of the «Burevestnik» stadium

При изучении состояния и декоративности растительности (рис. 2) отметим, что половина учтенных экземпляров (49%) имеет удовлетворительную оценку, и лишь у 27% растений зафиксировано хорошее жизненное состояние. У 10% берез обломлены вершины, 30% берёз имеют механические повреждения, а также морозобойные трещины и участки на стволе с отсутствием коры по всему диаметру. У 10% осин также зафиксированы морозобойные трещины. У черемухи отмечено значительное количество поросли и наличие тли, что отразилось на их ландшафтно-эстетической оценке. В целом, наивысший балл декоративности присвоен всего 17% деревьев и кустарников. Вторым и третьим баллом декоративности отмечены 72% представителей дендрофлоры. Ива козья имеет низкий балл декоративности, что проявляется наличием значительного количества сухих, сломанных и отмирающих ветвей и в целом неопрятным внешним видом. Также отмечено наличие сухостойных и поваленных деревьев березы и ивы. Рекомендуется запроектировать

омолаживающую и санитарную обрезку древесно-кустарниковой растительности, удалить с территории сухостой и валежников.

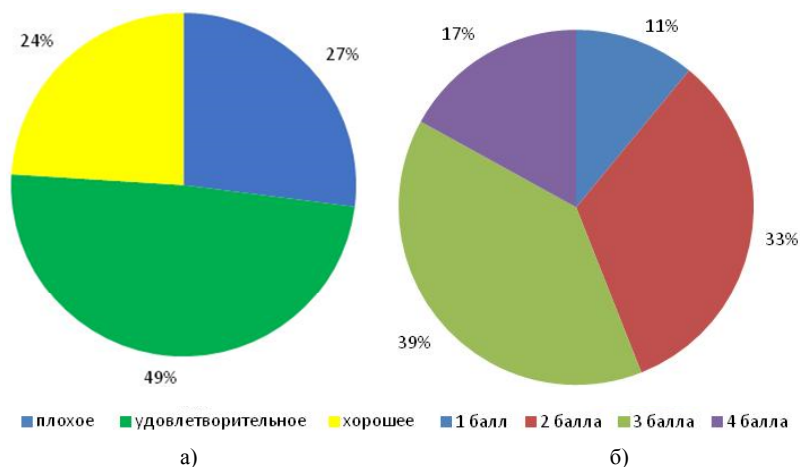


Рис. 2. Биоэкологическая (а) и ландшафтно-архитектурная (б) оценка деревьев и кустарников на территории стадиона «Буревестник»

Fig. 2. Bioecological (a) and landscape and architectural (b) assessment of trees and shrubs on the territory of the «Burevestnik» stadium

При исследовании древесно-кустарниковой растительности у административного здания стадиона установлено, что не соблюдены нормативы высадки деревьев у отмотки здания: при нормативном расстоянии не менее 5 м берёза пушистая и осина произрастают на расстоянии 1,5 м. Следует удалить эти растения, так как они совсем не декоративны, а по периметру здания высадить спирею среднюю.

В северо-восточной части запроектирована установка нескольких площадок для игр с мячом, таких как волейбол и баскетбол, и площадки для большого тенниса.

Как показали исследования, нагрузки на ландшафт по-разному распределяются в отдельных функциональных зонах спортивного комплекса, уменьшаясь от входной к спортивной зоне, а уровень требований к гигиеническим параметрам среды, наоборот, увеличивается в данном направлении.

Следовательно, для входной зоны с высокой рекреационной нагрузкой запроектирован торжественный регулярный стиль озеленения, включая цветочные композиции, являющиеся композиционным центром (рис. 3–5). Для этой цели будут высажены ель колючая (*Picea pungens* Engelm.), сосна горная (*Pinus mugo* Turra), спирея японская (*Spiraea japonica* L. f.), барбарис Тунбер-

га пурпуристый (*Berberis thunbergii* DC. «*Atropurpurea*»). Для мест отдыха спортсменов и занимающихся физкультурой выбран более естественный, пейзажный стиль озеленения. Живописные пейзажные приемы планировки способствуют снятию нервного напряжения [Потаев и др., 2017]. Создаются благоприятные санитарные условия для занятия спортом.

Под озеленение спортивного комплекса по существующим нормам отводится 30-50% площади [Боговая, Теодоронский, 2012]. С целью ветро- и шумозащиты по периметру спортивных сооружений запроектированы плотные живые изгороди шириной 5 м, состоящие из деревьев и кустарников. Расстояние в рядах между деревьями составляет 3 м, между рядами и кустарниками – 2 м [Теодоронский, Боговая, 2008, 2010].

Площадки различного назначения отделены друг от друга бордюрами или невысокими живыми изгородями. Для их создания отобраны породы с однотонной спокойной листвой, чтобы оборудование и инвентарь отчетливо выделялись на таком фоне, и исключены растения с блестящими листьями. Здесь будут высажены курильский чай (*Dasiphora fruticosa* (L.) Rydb.), туя западная (*Thuja occidentalis* L.) и др.

На территории спортивных парков должны присутствовать хвойные и красивоцветущие лиственные деревья и кустарники [Сокольская, 2019]. С этой целью в условиях Архангельской области для обогащения ассортимента спортивных объектов могут быть рекомендованы следующие виды: сосна сибирская кедровая (*Pinus sibirica* Du Tour), ель колючая голубая (сизая) (*Picea pungens* f. *glauca* (Regel) Beissn.), липа мелколистная (*Tilia cordata* Mill.), вяз шершавый (*Ulmus glabra* Huds.), тополь белый (*Populus alba* L.), тополь дрожащий (осина), береза повислая, рябина обыкновенная (*Sorbus aucuparia* L.), спирея средняя (*Spiraea media* Schmidt), чубушник венечный (*Philadelphus coronarius* L.), рябинник рябинолистный (*Sorbaria sorbifolia* (L.) A. Braun), пузыреплодник калинолистный «Диабло» (*Physocarpus opulifolius* (L.) Maxim. «*Diablo*»), дёрен белый, курильский чай, акация желтая (*Caragana arborescens* Lam.).

Цветники на территории спортивных объектов запроектированы при входе на стадион, у административного здания и у мест отдыха спортсменов. В ассортименте растений в цветниках представлены следующие многолетники: овсяница сизая (*Festuca glauca* Lam.), хосты гибридные (*Hosta ×hybrida* hort.) «Patriot» и «Abiqua Drinking Gourd», чистец византийский (*Stachys byzantina* K.Koch), гипсофила метельчатая (*Gypsophila paniculata* L.), шафран (*Crocus* spp. L.), мышиный гиацинт (*Muscari* spp. Mill.), кислица (*Oxalis* spp. L.), астильбы Арендса (*Astilbe ×arendsii* Arends) «Lollypop» и «Etna», гейхеры гибридные (*Heuchera ×hybrida* hort.) «Glitter» и «Marmalade».

Схемы создаваемых цветников представлены на рис. 3–5.

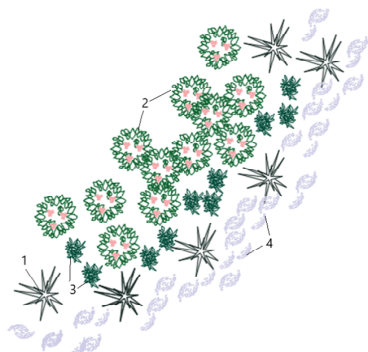


Рис. 3. Цветник № 1:

- 1 – астильба «Lollypop»; 2 – гейхера «Marmalade»; 3 – хоста «Patriot»;
4 – шафран

Fig. 3. Flower garden No. 1:

- 1 – *Astilbe ×arendsii* «Lollypop»;
2 – *Heuchera ×hybrida* «Marmalade»; 3 –
Hosta ×hybrida «Patriot»; 4 – *Crocus* spp.

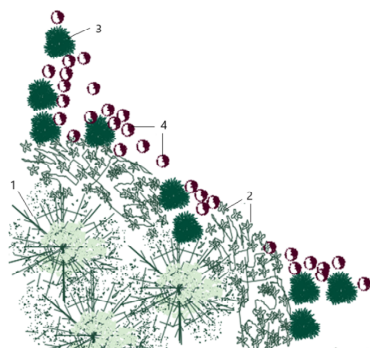


Рис. 4. Цветник № 2:

- 1 – гипсофила метельчатая; 2 – чистец византийский; 3 – овсяница сизая;
4 – кислица

Fig. 4. Flower garden No. 2:

- 1 – *Gypsophila paniculata*; 2 – *Stachys byzantina*; 3 – *Festuca glauca*;
4 – *Oxalis* spp.

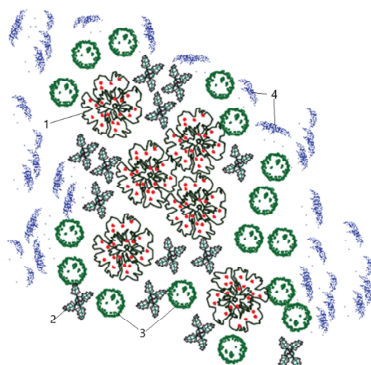


Рис. 5. Цветник № 3:

- 1 – астильба Арендса; 2 – гейхера «Glitter»;
3 – хоста «Abiqua Drinking Gourd»;
4 – мышиный гиацинт

Fig. 5. Flower garden No. 3:

- 1 – *Astilbe ×arendsii* spp.; 2 – *Heuchera ×hybrida* «Glitter»; 3 – *Hosta ×hybrida* «Abiqua Drinking Gourd»; 4 – *Muscari* spp.

Таким образом, для обеспечения среды, положительно влияющей на психологическое состояние спортсменов и занимающихся физической культурой, проектируемые участки спортивного комплекса взаимосвязаны с естественной природой окружающей местности.

Заключение. Спортивные комплексы (стадионы) должны обеспечивать наилучшие условия для занятий различными видами спорта, организации спортивных соревнований. Размещение насаждений должно быть подчинено и способствовать выполнению основных задач спортивной зоны. Нами установлено, что озеленению спортивных комплексов в г. Архангельске не уделяется должного внимания. Это проявляется в состоянии самих стадионов и отсутствии требуемого количества древесно-кустарниковой растительности. Имеющиеся насаждения имеют низкую декоративность (в среднем 2-3 балла) и удовлетворительное состояние (49%), что сказывается на выполнении ими защитных и микроклиматических функций, крайне необходимых для промышленных городов. На примере стадиона «Буревестник» предложены рекомендации по ландшафтной организации территории с учетом требований к древесно-кустарниковой растительности. Для повышения работоспособности спортсменов, их биологического и психологического комфорта, создания подходящих условий для занятий спортом необходимо создание благоприятного микроклиматического режима на спортивных площадках.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бабич Н.А., Карбасникова Е.Б., Андропова М.М., Залывская О.С., Александрова Ю.В., Гаевский Н.П. Ступенчатая интродукция видов дендрофлоры в северо-восточную часть Русской равнины (обзор) // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021. № 3. С. 73–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85.

Березко О.М., Соколинская О.В. Особенности ландшафтной организации загородных спортивных комплексов // Труды БГТУ. Серия 1: Лесное хозяйство, природопользование и переработка возобновляемых ресурсов. 2008. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-landshaftnoy-organizatsii-zagorodnyh-sportivnyh-kompleksov> (дата обращения: 17.04.2024).

Боговая И.О., Теодоронский В.С. Озеленение населенных мест. Учебное пособие. СПб., 2012. 240 с.

Быстрова Ю.С., Ляпин А.А., Колесникова А.Ю. Развитие спортивной инфраструктуры г. Иркутска: инновационный проект по созданию спортивного парка «Динамо» // Евразийский Союз Ученых. 2017. №9-1 (42). URL: <https://cyberleninka.ru>.

ru/article/n/razvitie-sportivnoy-infrastruktury-g-irkutska-innovatsionnyy-proekt-posozdaniyu-sportivnogo-parka-dinamo (дата обращения: 23.04.2024).

Горохов В.А. Зеленая природа города: учеб. пособие для вузов. 2-е изд. М.: Архитектура-С, 2005. 528 с.

Гостев В.Ф., Юскевич Н.Н. Проектирование садов и парков: учеб. для техникумов. М., 1991. 340 с.

Давыдова Д.А., Кузнецова Е.П. Концепция развития территории стадиона «Молот» в городе Перми // Вестник ПНИПУ. Строительство и архитектура. 2017. №1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-razvitiya-territorii-stadiona-molot-v-gorode-permi> (дата обращения: 23.04.2024).

Залывская О.С., Бабич Н.А. Оценка декоративности насаждений // ИВУЗ. Лесной журнал. 2020. № 6. С. 98–110. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-98-110.

Кандр Е.А. Благоустройство стадионов и спортивных парков // Теория и практика современной науки. 2017. №11 (29). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/blagoustroystvo-stadionov-i-sportivnyh-parkov> (дата обращения: 17.04.2024).

Общая характеристика климата Архангельской области. URL: <http://www.sevmeteo.ru/files/arh-nao.pdf> (дата обращения: 02.05.23).

Потаев Г.А., Мазаник А.В., Нитиевская Е.Е., Лазовская Н.А., Макознак Н.А., Потаева Г.Р. Архитектурно-ландшафтный дизайн: теория и практика: учеб. пособие / под общ. ред. Г.А. Потаева. М.: ФОРУМ: ИНФРА-М, 2017. 319 с.

Сокольская О.Б. Ландшафтная архитектура: озеленение и благоустройство территорий индивидуальной застройки: учеб. пособие. СПб.: Лань, 2019. 328 с.

Сунгурова Н.Р., Страздаускене С.Р., Стругова Г.Н., Макаров С.С. Состояние зеленых насаждений на территории дошкольных учреждений в г. Архангельске // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 245. С. 140–158.

Теодоронский В.С. Садово-парковое строительство: учебник. 3-е изд. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 336 с.

Теодоронский В.С., Боговая И.О. Объекты ландшафтной архитектуры: учеб. пособ. М.: ГОУ ВПО МГУЛ, 2008. 210 с.

Теодоронский В.С., Боговая И.О. Ландшафтная архитектура: учеб. пособ. М.: ФОРУМ, 2010. 304 с.

Теодоронский В.С., Сабо Е.Д., Фролов В.А. Строительство и эксплуатация объектов ландшафтной архитектуры. М.: Изд. центр «Академия», 2008. 352 с.

Травникова Г.И. Организация территории лесопарка. Архангельск: Изд-во ФГАОУ ВПО «Северный (Арктический) федеральный университет им. М.В. Ломоносова», 2011. 36 с.

Charra-Vaskou K., Charrier G., Wortemann R., Beikircher B., Cochard H., Ameglio T., Mayr S. Drought and frost resistance of trees: a comparison of four species at different sites and altitudes // Annals of Forest Science. 2012. Vol. 69 (3). P. 325–333. DOI: 10.1007/s13595-011-0160-5.

References

- Babich N.A., Karbasnikova E.B., Andronova M.M., Zalyvskaya O.S., Alexandrova Yu.V., Gaevskiy N.P. Stepwise introduction of dendroflora species into the northeastern part of the Russian plain (review). *IVUZ. Forest Journal*, 2021, no. 3, pp. 73–85. DOI: 10.37482/0536-1036-2021-3-73-85. (In Russ.)
- Berezko O.M., Sokolinskaya O.V. Features of landscape organization of suburban sports complexes. *Trudy BSTU. Series 1: Forestry, environmental management and processing of renewable resources*, 2008, no.1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/osobennosti-landshaftnoy-organizatsii-zagorodnyh-sportivnyh-kompleksov> (accessed April 17, 2024). (In Russ.)
- Bogovaya I.O., Teodoronskiy V.S. Landscaping of populated areas: A textbook. St. Petersburg, 2012. 240 p. (In Russ.)
- Bystrova Yu.S., Lyapin A.A., Kolesnikova A.Yu. Development of sports infrastructure in Irkutsk: an innovative project to create a sports park «Dynamo». *Eurasian Union of Scientists*, 2017, no.9-1 (42). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/razvitie-sportivnoy-infrastruktury-g-irkutska-innovatsionnyy-proekt-po-sozdaniyu-sportivnogo-parka-dinamo> (accessed April 23, 2024). (In Russ.)
- Charra–Vaskou K., Charrier G., Wortemann R., Beikircher B., Cochard H., Ameglio T., Mayr S. Drought and frost resistance of trees: a comparison of four species at different sites and altitudes. *Annals of Forest Science*, 2012, vol. 69 (3), pp. 325–333.
- Davydova D.A., Kuznetsova E.P. The concept of the development of the territory of the Molot stadium in the city of Perm. *Bulletin of PNRPU. Construction and architecture*, 2017, no.1. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/kontseptsiya-razvitiya-territorii-stadiona-molot-v-gorode-permi> (accessed April 23, 2024). (In Russ.)
- General characteristics of the climate of the Arkhangelsk region [Electronic resource]. Access mode: <http://www.sevmeteo.ru/files/arh-nao.pdf> (accessed May 02, 2023). (In Russ.)
- Gorokhov V.A. The green nature of the city: textbook for universities. 2nd edition. M.: Architecture-C, 2005. 528 p. (In Russ.)
- Gostev V.F., Yuskevich N.N. Designing gardens and parks: textbook for technical schools. M., 1991. 340 p. (In Russ.)
- Kandr E.A. Landscaping of stadiums and sports parks. *Theory and practice of modern science*, 2017, no. 11 (29). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/blagoustroystvo-stadionov-i-sportivnyh-parkov> (accessed April 17, 2024). (In Russ.)
- Potaev G.A., Mazanik A.V., Nitievskaya E.E., Lazovskaya N.A., Makoznak N.A., Potaeva G.R. Architectural and landscape design: theory and practice: textbook / under the general editorship of G.A. Potaev. M.: FORUM: INFRA-M, 2017. 319 p. (In Russ.)
- Sokolskaya O.B. Landscape architecture: landscaping and landscaping of territories of individual development: textbook. St. Petersburg: Lan, 2019. 328 p. (In Russ.)

Sungurova N.R., Strazdauskene S.R., Strugova G.N., Makarov S.S. The state of green spaces on the territory of preschool institutions in Arkhangelsk. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 245, pp. 140–158. (In Russ.)

Teodoronskiy V.S. Garden and park construction: textbook. 3rd ed. M.: GOU VPO MGUL, 2008. 336 p. (In Russ.)

Teodoronskiy V.S., Bogovaya I.O. Objects of landscape architecture: textbook. M.: GOU VPO MGUL, 2008. 210 p. (In Russ.)

Teodoronskiy V.S., Bogovaya I.O. Landscape architecture: textbook. M.: FORUM, 2010. 304 p. (In Russ.)

Teodoronskiy V.S., Sabo E.D., Frolov V.A. Construction and operation of landscape architecture objects. M.: Publishing Center «Academy», 2008. 352 p. (In Russ.)

Travnikova G.I. Organization of the territory of the forest park. Arkhangelsk: Publishing house of the Federal State Educational Institution of Higher Education «Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov», 2011. 36 p. (In Russ.)

Zalyvskaya O.S., Babich N.A. Assessment of decorative plantings. *IVUZ. Forest Journal*, 2020, no. 6, pp. 98–110. DOI: 10.37482/0536-1036-2020-6-98-110. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 20.05.2024

Сунгурова Н.Р., Страздаускене С.Р., Стругова Г.Н., Макаров С.С., Страздаускас С.Е. Ландшафтная организация территории спортивных сооружений в г. Архангельске // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 45–91. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.45-61*

Рассмотрена ландшафтная организация территории спортивных сооружений в г. Архангельске. Цель исследований – проверить ландшафтную организацию территории спортивных сооружений в г. Архангельске на соответствие нормативным документам и предложить мероприятия по ее улучшению. Объектами исследований выступили спортивные комплексы: «Труд», «Динамо», «Буревестник», «Волна», физкультурно-спортивный комплекс им. А.Ф. Личутина и лыжный стадион им. В.С. Кузина. Эти объекты отличаются размером, состоянием покрытий спортивных полей, площадок и дорожек, наличием необходимого инвентаря и специального оборудования, удаленностью от центра города. Спортивные комплексы располагаются на Европейском Севере, для которого характерны суровые климатические условия с продолжительной зимой и относительно прохладным и дождливым летом. Эти условия, несомненно, влияют на состав ассортимента урбанофлоры (в результате он довольно бедный). В ходе изучения зеленых насаждений на территории спортивных комплексов проводили следующие виды оценки: дендрологическую, биоэкологическую и эстетическую

(ландшафтно-архитектурную). Дендрофлора насаждений на территории обследуемых спортивных комплексов не отличается видовым разнообразием и представлена 11 видами деревьев и кустарников. 8 пород являются аборигенными, а 3 – интродуцентами. Нами установлено, что озеленению спортивных комплексов в г. Архангельске не уделяется должного внимания. Насаждения имеют низкую декоративность (в среднем 2-3 балла) и удовлетворительное состояние (49%). По количеству деревьев и кустарников и по их качеству зеленые насаждения не соответствуют нормативным требованиям. На примере стадиона «Буревестник» предложены рекомендации по ландшафтной организации территории с учетом требований к древесно-кустарниковой растительности. Создание благоприятного микроклиматического режима на спортивных площадках, биологического и психологического комфорта для спортсменов повышает их работоспособность, удлиняет сезон комфортных условий для занятий спортом.

Ключевые слова: ландшафтная организация, спортивные комплексы, ландшафтные объекты, деревья, кустарники, озеленение.

Sungurova N.R., Strazdauskas S.R., Strugova G.N., Makarov S.S., Strazdauskas S.E. Landscape organization of the territory of sports facilities in Arkhangelsk. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 45–61 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.45-61

The landscape organization of the territory of sports facilities in the city of Arkhangelsk is considered. The purpose of the research is to check the landscape organization of the territory of sports facilities in the city of Arkhangelsk for compliance with regulatory documents and propose measures to improve it. The objects of research were sports complexes: «Trud», «Dynamo», «Burevestnik», «Volna», as well as the A.F. Lichutin sports complex and the V.S. Kuzin ski stadium. These facilities differ in size, condition of sports fields, playgrounds and tracks, availability of necessary equipment and special equipment, and remoteness from the city center. Sports complexes are located in the European North, which is characterized by harsh climatic conditions with long winters, relatively cool and rainy summers. These conditions undoubtedly affect the urban flora assortment (as a result, it is rather poor). During the study of green spaces on the territory of sports complexes, the following types of assessment were carried out: dendrological, bioecological and aesthetic (landscape and architectural). The dendroflora of plantings on the territory of the surveyed sports complexes does not differ in species diversity and is represented by 11 species of trees and shrubs. Moreover, 8 breeds are indigenous, and 3 are introduced. We have found that landscaping of sports complexes in Arkhangelsk is not given due attention. The plantings have low decorative value (on average 2-3 points) and satisfactory condition (49%). In terms of the number of trees and shrubs and their quality, green spaces do not meet regulatory requirements. Using the example of the Burevestnik stadium, recommendations on the landscape organization of the territory, taking into account the requirements for tree and shrub vegetation, are

proposed. The creation of a favorable microclimatic regime on sports grounds, biological and psychological comfort for athletes increases their performance, lengthens the season of comfortable conditions for sports.

Key words: landscape organization, sports complexes, landscape objects, trees, shrubs, landscaping.

СУНГУРОВА Наталья Рудольфовна – профессор кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доцент, доктор сельскохозяйственных наук. ResearcherID: H-1847-2019. ORCID: 0000-0002-8464-4596.

163002, ул. набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: n.sungurova@narfu.ru

SUNGUROVA Natalya R. – DSc (Agricultural), Professor of the Department of Landscape Architecture and Artificial Forests of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Associate Professor. ResearcherID: H-1847-2019. ORCID: 0000-0002-8464-4596.

163002. Northern Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: n.sungurova@narfu.ru

СТРАЗДАУСКЕНЕ Светлана Рудольфовна – аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов Высшей школы естественных наук и технологий Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. ResearcherID: HKM-7435-2023. ORCID: 0000-0001-5229-1004.

163002, ул. набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: svsun@bk.ru

STRAZDAUSKENE Svetlana R. – PhD student of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ResearcherID: HKM-7435-2023. ORCID: 0000-0001-5229-1004.

163002. Northern Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: svsun@bk.ru

СТРУГОВА Галина Николаевна – аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов Высшей школы естественных наук и технологий Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова.

163002, ул. набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: strugova.galina@yandex.ru

STRUGOVA Galina N. – PhD student of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

163002. Northern Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: strugova.galina@yandex.ru

МАКАРОВ Сергей Сергеевич – заведующий кафедрой декоративного садоводства и газоноведения Российского государственного аграрного университета – Московской сельскохозяйственной академии имени К.А. Тимирязева, доктор сельскохозяйственных наук.

127434, ул. Тимирязевская, д. 49, г. Москва, Россия. E-mail: makarov_serg44@mail.ru

MAKAROV Sergey S. – DSc (Agricultural), Head of the Department of Decorative Horticulture and Lawn Science of the Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy named after K.A. Timiryazev.

127434. Timiryazevskaya st. 49. Moscow. Russia. E-mail: makarov_serg44@mail.ru

СТРАЗДАУСКАС Сергей Евгеньевич – аспирант кафедры ландшафтной архитектуры и искусственных лесов Высшей школы естественных наук и технологий Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова.

163002, ул. набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: strazdauskassergey@yandex.ru

STRAZDAUSKAN Sergey E. – PhD student of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov.

163002. Northern Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: strazdauskassergey@yandex.ru

**Д.Ю. Капиталинин, В.М. Сидоренков, Ю.С. Ачиколова, Д.О. Астапов,
О.В. Рябцев, Р.В. Щекалев**

ОЦЕНКА КАЧЕСТВА ТАКСАЦИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ЛЕСОТАКСАЦИОННОГО ДЕШИФРИРОВАНИЯ ДАННЫХ СПУТНИКОВОЙ СЪЕМКИ SENTINEL-2

Введение. Лесоустройство зародилось из необходимости иметь точную информацию о лесах. Лесоустройство берет свое начало на рубеже XVII–XVIII веков. Именным указом Петра I от 19 ноября 1703 года впервые предписывалось описать леса в городах и уездах, во исполнение которого были учтены леса по берегам больших (Волга, Дон, Днепр) и малых (Воронеж, Десна, Хопёр) рек. Учитывая важность оценки запаса лесных ресурсов, уже в те давние времена лесоустройство и таксация леса начинают производить точный учет количественных и качественных характеристик лесных насаждений [Черных, 2018; История..., 2024; Лесоустройство..., 2024].

С вовлечением в хозяйственный оборот значительных площадей лесов, внедрением средств механизации при использовании лесов развиваются и методы учета леса. Появляются технологии дистанционного зондирования Земли, которые позволяют провести первичную оценку лесного фонда на значительных территориях. Первые работы в области использования дистанционных методов лесоустройства были начаты в 20–30-е годы прошлого века с использованием данных аэрофотосъемки на территории Ленинградской и Калининградской областей. На основе разработанных технологий в конце 50-х годов прошлого века было проведено изучение и картографирование лесов. До начала Отечественной войны Всесоюзной лесоустроительной конторой «Леспроект» сформирован комбинированный метод таксации с дешифрированием аэрофотоснимков, установлена точность инвентаризации с учетом технологий применения материалов съемки. Значительный вклад в развитие дистанционных методов в это время внесли Новосельский А.Е., Пронин А.К., Самойлович Г.Г. и др. [Дмитриев и др. 1989; Малышева, 2012].

Появление цветной спектрально-зональной съемки в конце 50-х привело к увеличению точности лесотаксационного дешифрирования и переводу из вспомогательных методов учета леса в основные. Появление в конце 60-

х годов прошлого века спутниковых данных открыло новые горизонты для лесотаксационного дешифрирования [Данюлис и др., 2004].

В то же время возросшие требования к достоверности и оперативности получения информации о лесном фонде побуждали перейти на передовые технологии ее получения и использования. Возникла необходимость в разработке технологий автоматизации процесса лесотаксационного дешифрирования различных данных.

Приведенное положение было поддержано в тексте Концепции развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли (далее ДЗЗ) до 2025 года [Концепция..., 2006]. Концепция способствует развитию российского рынка ДЗЗ, концентрируя выделенные ресурсы для достижения национальных целей использования ДЗЗ и решения приоритетных задач, определяющих темпы социально-экономического развития России. Важным направлением в достижении поставленной цели является апробация разработанных технологий лесотаксационного дешифрирования и их проверка в полевых условиях.

Современные технологические решения в области таксационного дешифрирования позволяют с достаточной точностью определить породный состав насаждений, сомкнутость полога и запас. В значительном объеме исследований, применяемых в таксации в настоящее время, решение данных вопросов построено на комплексном дешифрировании данных спутниковой съемки, сочетающем элементы визуального анализа, а также результаты обработки спектральных характеристик [Сухих, 2005; Толпин и др., 2011; Жарко и др., 2016; Барталев и др., 2017].

Алгоритмы спектрального анализа основываются на обработке данных по отражению насаждениями света. Спектральная яркость древесной растительности сильно изменяется, но имеет общность, выражающуюся в минимумах и максимумах в оптическом диапазоне спектра. Минимум наблюдается из-за поглощения солнечных лучей синего и красного участков спектра пигментами листьев растений. Максимум наблюдается в зеленом участке спектра, он обусловлен отражением излучения поверхностями листьев, а в ближней инфракрасной части спектра – внутренней структурой листа. Изменение коэффициента спектральной яркости (r) в различных диапазонах спектра позволяет сформировать спектральный образ исследуемых объектов. Полученные взаимосвязи спектральных образов с породами деревьев, их таксационными характеристиками являются основой для автоматизации процессов распознавания породного состава насаждений с учетом долевого участия пород в составе верхнего полога. Обзор ранее

проведенных исследований показывает возможность автоматизации процессов определения ряда таксационных показателей насаждений по данным съемки с сенсоров *Landsat 8*, *Sentinel-2*, *Канопус-В* [Жири́н и др., 1995; Барта́лев и др., 2016, 2017]. Спектральный образ объекта несет информацию только по его состоянию на определённый момент времени. Учитывая, что в зависимости от сезона года, характеристики лесной растительности меняются, для распознавания породного состава необходимо иметь набор спектрально-отражательных характеристик по каждому спутнику для разных сезонов года с учетом фенологической динамики для различных времен года.

Одним из основных дешифрируемых элементов является различие у разных пород процессов развития ассимиляционного аппарата в течение года. Особенно данный вопрос актуален при дешифрировании березовых и осиновых насаждений. Участие в составе насаждения различных пород существенно усложняет задачу и снижает точность исследований. В ранее проведенных исследованиях большинство алгоритмов определения породного состава лесов ориентировано на чистые насаждения. В указанных работах смешанные насаждения относятся к двум категориям – леса с преобладанием хвойных пород и леса с преобладанием лиственных пород. [Жири́н и др., 1995; Лупя́н и др., 2014; Барта́лев и др., 2016, 2017]. Сложность определения породного состава лесов по спектральным данным связана с различными коэффициентами отражения в зависимости от возраста древостоя, смешения пород и сезона года. Создание библиотек спектрально-отражательных характеристик, учитывающих влияние перечисленных выше факторов, является сложной задачей, но практически единственным выходом для реализации алгоритмов автоматического дешифрирования спутниковых данных с различных сенсоров. Перспективность данного направления доказана экспериментальными работами по дешифрированию породного состава лесов России в программном комплексе Вега (разработка ИКИ РАН) [Лупя́н и др., 2014]. Метод основывается на анализе рядов еженедельных композитов изображений r , отражающих динамику лесной растительности. Данный метод позволил сформировать временные ряды композитных изображений спутниковых наблюдений сенсором *Modis* в красном (0,62–0,67) и ближнем инфракрасном (0,84–0,88) каналах для всей территории России. Были получены данные по изменению спектральных характеристик в красном и ближнем инфракрасном каналах для всех типов насаждений. Обобщение изменений спектральных отражательных характеристик растительного покрова позволило получить данные по фенологи-

ческой динамике лесов [Лупян и др., 2014]. Учитывая проведенные ранее исследования, дешифрирование данных спутниковой съемки *Sentinel-2* осуществлялось в зимний период времени, когда спектрально-отражательные характеристики насаждений не имеют различия в зависимости от фенологических фаз.

Одним из нерешённых вопросов в области дешифрирования данных спутниковой съемки является определение возрастных характеристик насаждений. По результатам выполненных ранее оценок установлено, что даже применение современных методов классификации не позволяет получить необходимую точность определения возраста насаждений. Сложность решения затронутого вопроса зависит от проработки методов верификации условий произрастания. В частности, одним из таких факторов является бонитет насаждений, который прямо коррелирует с условиями произрастания. Точность его определения при лесоустройстве практически создает основу для зонирования территории по продуктивности условий произрастания. Бонитировка территории является основой для установления возраста насаждений по связям с запасом насаждений, полнотой и числом деревьев основного полога. В большинстве лесорастительных условий (кроме лесов северной тайги и редкостойных насаждений) зонирование территории по бонитету является показателем перманентным. В теоретическом аспекте естественно возобновившиеся леса после антропогенного воздействия (рубки ухода) или природных факторов (ветровал, вредители леса и пр.) должны приводить к формированию насаждений не ниже класса бонитета ранее существовавших [Сидоренков и др., 2019]. Результаты практических исследований показывают, что для большинства лесорастительных условий в светлохвойных формациях лесов, а также в мягколиственных вторичных лесах сохраняется данная тенденция. Исключение составляют темнохвойные формации лесов, естественная биология формирования которых (длительное произрастание под пологом) может приводить к погрешности в возрасте до 60 лет. В то же время оценка чистых или смешанных насаждений с учетом хода роста хоть и приводит к ошибке в возрасте насаждений, но практически соответствует точности их определения по показателям средней высоты, запаса и бонитету.

Эффективность ведения лесного хозяйства определяется актуальными данными лесоустройства. Перечисленные особенности взаимосвязи таксационных характеристик насаждений с их спектрально-отражательными показателями дают возможность для разработки сервисов автоматизации

определения таксационных характеристик насаждений и проверки данных лесоустройства.

В современной политике государства данное направление приобретает значительную актуальность в деятельности контролирующих органов. Одним из направлений такой политики является применение риск-ориентированного подхода при организации государственного контроля. Хотя контроль качества проведения лесоустройства не относится к контрольно-надзорной деятельности, однако, по сути, проверочные мероприятия сопоставимы с принципами применения риск-ориентированного подхода.

Риск-ориентированный подход представляет собой метод организации и осуществления контроля, при котором в предусмотренных случаях выбор интенсивности (формы, продолжительности, периодичности) проведения мероприятий по контролю определяется отнесением производственных объектов к определенной категории риска. Соответствующие категории риска при контроле качества проведения лесоустройства необходимо устанавливать с учетом тяжести потенциальных негативных последствий возможного несоблюдения обязательных требований, а также с учетом оценки вероятности такого несоблюдения.

Основными нормативно-правовыми актами при контроле качества проведения лесоустройства являются Лесоустроительная инструкция [Приказ..., 2022] и Регламент [Приказ..., 2024]. Согласно тексту Лесоустроительной инструкции заказчик контролирует организацию и оценивает качество проведения полевых работ по таксации лесов исполнителем. Также заказчик проводит выборочную проверку полевых работ по таксации лесов, при которой в отношении исполнителя единовременной проверке подлежат 30 лесотаксационных выделов при средней величине лесотаксационного выдела до 15 гектар включительно и 20 лесотаксационных выделов при средней величине лесотаксационного выдела более 15 гектар.

В среднем на объект лесоустройства (от лесопользователя с десятком кварталов в аренде до полноценного лесничества с сотнями кварталов) приходится порядка тысячи выделов. Таким образом, проверке подвергается менее 3% лесотаксационных выделов на каждый объект лесоустройства, что является крайне незначительным. С целью повышения контроля качества лесотаксационной информации, объективного подбора объектов проверки необходимо по возможности внедрять предварительную оценку

несоответствий (риск-ориентированный подход) с помощью ДЗЗ и программных продуктов на основе искусственного интеллекта, чтобы в последующем осуществлять выход в натуру.

Методика выполнения работ. Методика выполнения работ построена на сочетании различных способов таксации леса и автоматических систем дешифрирования данных спутниковой съемки. Учитывая важность практического внедрения результатов исследований, проверка материалов таксации леса осуществляется в соответствии с установленными критериями точности различных показателей, определённых лесоустроительной инструкцией. В пределах выдела в автоматическом режиме проводится анализ спектрально-отражательных характеристик насаждения, определяются их средние значения по каналам в видимом диапазоне спектра и в инфракрасном (b1 – b4) по данным зимней спутниковой съемки *Sentinel-2*. При анализе исключаются прогалины, нехарактерные для выдела участка. На основе полученных данных формируется таблица соответствия спектрально-отражательных характеристик насаждений и таксационных показателей по каждому выделу.

Анализ данных материалов таксации осуществляется с использованием различных алгоритмов машинного обучения: полиномиальная, факторная, множественная регрессии, а также алгоритмы на основе нейросетей глубокого обучения с использованием среды разработки *Python* и библиотеки *Keras*. Первичная обработка данных осуществляется в программном пакете *Statistica*. На ее основе определяются зависимости спектрально-отражательных характеристик насаждений с их таксационными показателями на основе полиномиального уравнения множественной регрессии.

Исследования проводились по материалам таксации лесов на территории Ерахтурского лесничества Рязанской области. В результате по показателю запаса и возраста насаждений получены модели их определения по спектрально-отражательным характеристикам, проведены расчеты их прогнозируемых значений (рис. 1, 2). Отклонение фактических значений от прогноза более чем на 30% принималось за вероятную ошибку таксации.

Ошибки материалов таксации определяются как отклонение прогнозируемых моделью показателей и измеренных в пределах установленной лесоустроительной инструкции точности (отклонение по показателю запаса, полноты, возраста более 30%).

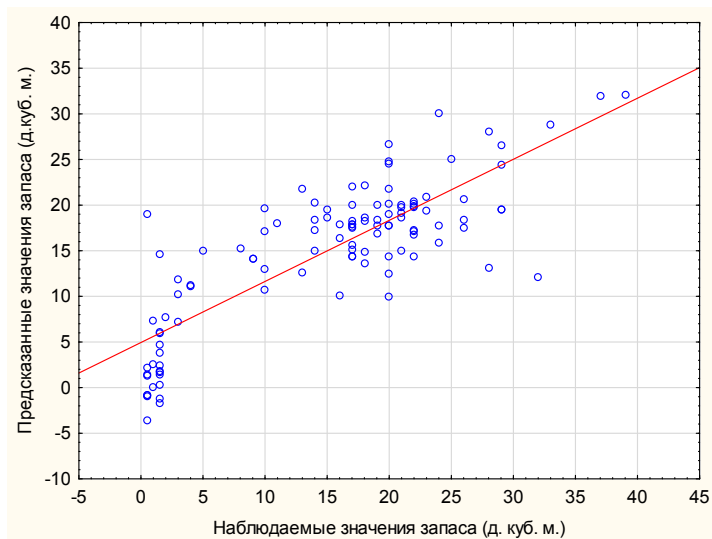


Рис. 1. Получение прогнозных значений запаса насаждений на основе модели полиномиальной множественной регрессии ($R=0,8$; $p=0$; $F=20$)

Fig. 1. Obtaining forecast values of the stock of plantings based on the model of polynomial multiple regression ($R=0,8$; $p=0$; $F=20$)

Модель оценки запаса насаждения по спектрально-отражательным характеристикам можно описать уравнением:

$$M = 43,189 - 117,935*b_1 + 204,198*b_1^2 - 1388,355*b_2 + 4896,398*b_2^2 + 2037,914*b_3 - 10330,613*b_3^2 - 511,604*b_4 + 3078,236*b_4^2 - 10,91*B + 2,086*B^2, \quad (1)$$

где M – запас насаждения, на га в д. м³; b_1, b_2, b_3, b_4 – спектральные каналы; B – бонитет насаждения.

По таблице выбросов составляется геоинформационная карта нахождения участков с ошибками таксации насаждений. На основе полученной информации осуществляется проверка данных в полевых условиях методами глазомерно-измерительной таксации (реласкопическими площадками). При проведении полевых исследований данные повторно анализируются, отмечаются неточности модели и совершенствуется алгоритм определения таксационных характеристик насаждений.

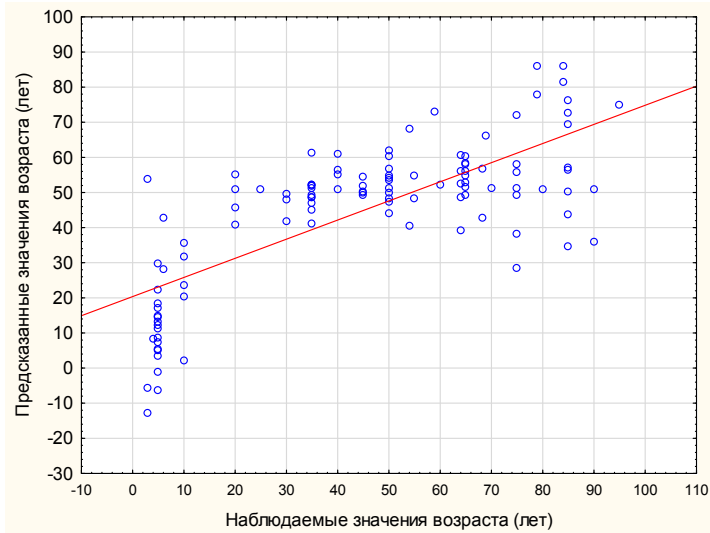


Рис. 2. Получение прогнозных значений возраста насаждений на основе модели полиномиальной множественной регрессии ($R=0,7$; $p=0$; $F=15$)

Fig. 2. Obtaining predictive values of the age of plantings based on the model of polynomial multiple regression ($R=0,7$; $p=0$; $F=15$)

Модель оценки возраста насаждения по спектрально-отражательным характеристикам можно описать уравнением:

$$\begin{aligned} A = & 91,714 - 201,587 \cdot b_1 + 143,149 \cdot b_1^2 - 3780,160 \cdot b_2 + \\ & + 13368,607 \cdot b_2^2 + 5132,959 \cdot b_3 - 27794,024 \cdot b_3^2 - \\ & - 1046,106 \cdot b_4 + 8095,291 \cdot b_4^2 - 2,68 \cdot B - 0,487 \cdot B^2, \end{aligned} \quad (2)$$

где A – возраст насаждения, лет; b_1, b_2, b_3, b_4 – спектральные каналы; B – бонитет насаждения

Обсуждение. Апробация технологии лесотаксационного дешифрирования спутниковых данных позволила выявить ошибки на 33 участках, для большинства из этих участков наблюдается ошибка по нескольким показателям (рис. 3–5).

Апробация полученных результатов проводилась по данным повторных полевых исследований. При проведении полевых исследований определение таксационных характеристик проводилось методом реласкопических площадок. Результаты апробации показывают, что из 33 выделов ошибки таксации подтвердились в 5 выделах по возрасту и в 16 выделах по запасу. Процент подтверждения ошибок таксации составляет 64% (табл. 1).

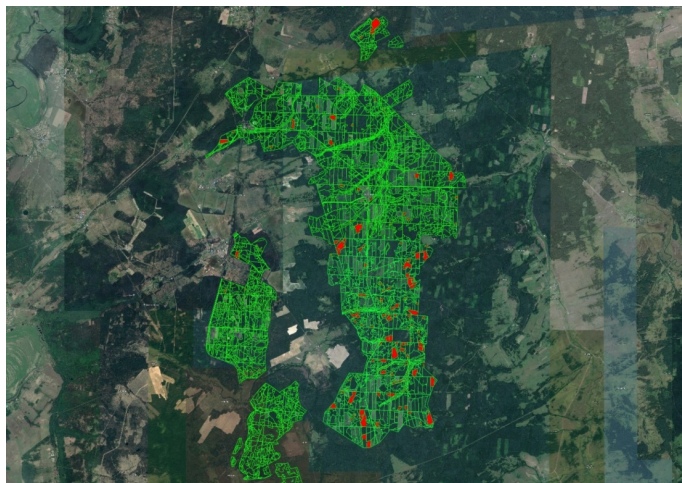


Рис. 3. Ошибки определения запаса насаждений, выявленные по результатам работы модели

Fig. 3. Errors in determining the stock of plantings identified by the results of the model

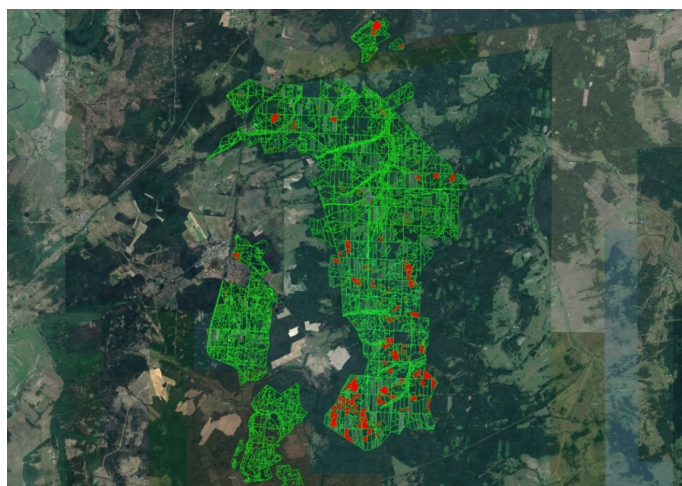


Рис. 4. Ошибки определения возраста насаждений, выявленные по результатам работы модели

Fig. 4. Errors in determining the age of plantings identified by the results of the model

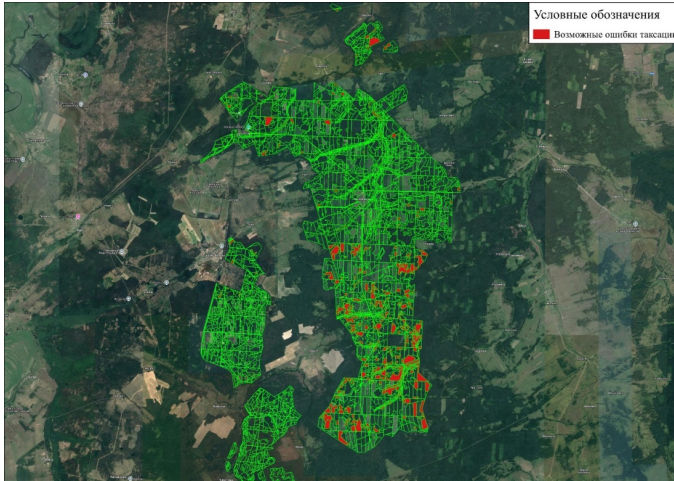


Рис. 5. Ошибки определения преобладающей породы насаждений, выявленные по результатам работы модели

Fig. 5. Errors in determining the predominant species of plantings identified by the results of the model

Таблица 1

Результативность определения ошибок лесной таксации

Effectiveness of determining errors in forest taxation

Число наблюдений	Ошибка > 30%			Ошибка > 50%		Выделы с подтвержденными ошибками	
	Возраст	Запас	Порода	Возраст	Запас	Возраст	Запас
33	10	20	11	8	7	5	16

Выводы. Представленная технология определения ошибок лесной таксации позволяет выявить участки с предполагаемой ошибкой по запасу насаждений, возрасту, породе. Процент выявления приближается к 70%, что является хорошим результатом при первичной апробации технологии. Погрешность определения таксационных характеристик насаждения связана с использованием данных съемки за различные даты и, как следствие, возможным влиянием атмосферы на спектрально-отражательные характеристики насаждений. Существенна также общая погрешность представленных

для анализа материалов таксации. Анализ показал, что в данных таксации идет занижение запаса насаждений по сравнению с фактическими измерениями. Такая тенденция, возможно, связана с таксацией насаждения методами реласкопических площадок, при котором может занижаться запас высокопродуктивных приспевающих, спелых и перестойных насаждений. Полученные результаты позволили выявить недостатки технологии, которые в дальнейших исследованиях будут учитываться в части разработки алгоритмов атмосферной коррекции данных спутниковой съемки и алгоритмов анализа таксационных характеристик насаждений в зависимости от их особенностей роста в различных лесорастительных условиях. При проведении дальнейших исследований планируется совершенствовать алгоритм обработки данных таксации и спутниковой съемки с использованием сверхточных сетей глубокого обучения на основе библиотеки *Keras*.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Барталев С.А., Егоров В.А., Жарко В.О., Лузян Е.А., Плотников Д.Е., Хвостиков С.А., Шабанов Н.В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.

Барталев С.А., Лузян Е.А., Балашов И.В., Барталев С.С., Бурцев М.А., Бриль А.А., Егоров В.А., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Оксюкевич А.Ю., Прошин А.А., Сенько К.С., Стыценко Ф.В., Уваров И.А. Возможности создания региональных систем комплексного дистанционного мониторинга лесов // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли: матер. IV Междунар. науч. конф. Красноярск: СФУ, 2017. С. 32–35.

Данюлис Е.П., Жирин В.М., Сухих В.И., Эльман Р.И. Дистанционное зондирование в лесном хозяйстве. М.: Агропромиздат, 1989. 223 с.

Дмитриев И.Д., Мурахтанов Е.С., Сухих В.И. Лесная авиация и аэрофото-съемка. М.: Агропромиздат, 1989. 366 с.

Жарко В.О., Барталев С.А., Егоров В.А. Использование спутниковых данных ПРОБА-V для оценки запасов стволовой древесины на территории Приморского края // Тезисы докладов 14-й всероссийской конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». М.: ИКИ РАН, 2016. С. 368.

Жирин В.М., Барталев С.А., Еришов Д.В. Спектрометрическая оценка состояния древесных растений при мониторинге лесов // Математическое моделирование и мониторинг лесных экосистем. М., 1995. С. 14.

История лесоустройства. URL: <https://dzen.ru/a/ZG8PqNXOWQODWgGY> (дата обращения: 31.03.2024).

Концепция развития российской космической системы дистанционного зондирования Земли на период до 2025 года. 2006. URL: https://docs.yandex.ru/docs/view?url=ya-browser%3A%2F%2F4DT1uXEPRrJRXIUfoewruCY7TirJztViH0wC2NBOX3egcGKBrGp4VHIZ_dpVsyS3Zwdy_ebbYOJpkeyOZRXYu9pBhTnNGvBZ27a4cmrigNgqPCJpQLfcDoN1igLpHBCRLl_bkVIEOsIxpRe_fvQ%3D%3D%3Fsign%3Dye7hhDetAEMiQVqby9iddp2n5emF15uNZAbelj86i3k%3D&name=file766.doc&nosw=1 (дата обращения: 21.09.2024).

Лабутина И.А. Дешифрирование аэрокосмических снимков. М.: Аспект-Пресс, 2004. 184 с.

Лесоустройство казенных лесов на Урале. URL: <https://www.permarchive.ru/index.php?page=lesoustroystvo-kazennyh-lesov-na-urale> (дата обращения: 31.03.2024).

Лузян Е.А., Барталев С.А., Толпин В.А., Крашенинникова Ю.С., Оксюкевич А.Ю. Возможности и опыт использования спутникового сервиса Вега при организации регионального дистанционного мониторинга // Региональные проблемы дистанционного зондирования Земли : матер. Междунар. науч. конф. Красноярск: СФУ, 2014. С. 3–6.

Малышева Н.В. Автоматизированное дешифрирование аэрокосмических изображений лесных насаждений. М.: МГУЛ, 2012. 154 с.

Приказ Минприроды России № 510 от 05.08.2022 «Об утверждении Лесоуправительной инструкции».

Приказ Рослесхоза № 102 от 26.02.2024 «Об утверждении Регламента организации и проведения лесоуправительных совещаний, коллективных (индивидуальных) тренировок, контроля качества проведения лесоуправительства и качества подготовки лесоуправительной документации, а также утверждения лесоуправительной документации в отношении мероприятий по таксации лесов, проектированию мероприятий по сохранению лесов, проектированию лесничеств и признании утратившим силу приказа Федерального агентства лесного хозяйства № 815 от 18.07.2023».

Сидоренков В.М., Косицын В.Н., Калнин В.В., Кушнырь О.В., Рыбкин А.С. Современные тенденции развития лесотаксационного дешифрирования по данным спутниковой съемки // Лесохозяйственная информация. 2019. № 3. С. 48–60.

Сухих В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2005. 392 с.

Толпин В.А., Балашов И.В., Ефремов В.Ю., Лузян Е.А., Прошин А.А., Уваров И.А., Флитман Е.В. Создание интерфейсов для работы с данными современных систем дистанционного мониторинга (система GEOSMIS) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 3. С. 93–108.

Черных В.В. Лесное законодательство при правлении Павла I и учреждение лесного департамента // Сибирский юридический вестник. 2018. №1 (80). С. 23–32.

References

Bartalev S.A., Egorov V.A., Jarko V.O., Lupyan E.A., Plotnikov D.E., Khvostikov S.A., Shabanov N.V. Satellite mapping of the vegetation cover of Russia. M.: IKI RAS, 2016. 208 p. (In Russ.)

Bartalev S.A., Lupyan E.A., Balashov I.V., Bartalev S.S., Burtsev M.A., Bril A.A., Egorov V.A., Kashnitskaya A.V., Mazurov A.A., Oksyukevich A.Yu., Proshin A.A., Senko K.S., Stitsenko F.V., Uvarov I.A. The possibilities of creating regional integrated remote forest monitoring systems. *Regional problems of remote sensing of the Earth* : mater. of the IV International Scientific Conference. Krasnoyarsk: NFU, 2017, pp. 32–35. (In Russ.)

The concept of the development of the Russian space system for remote sensing of the Earth for the period up to 2025. 2006. (accessed September 21, 2024).

Danuyilis E.P., Jirin V.M., Sukhikh B.I., Elman R.I. Remote sensing in forestry. M., 1989. 223 p. (In Russ.)

Forest management of state-owned forests in the Urals. URL: <https://www.permarchive.ru/index.php?page=lesoustrojstvo-kazennyh-lesov-na-urale> (accessed March 31, 2024).

Dmitriev I.D., Murakhtanov E.S., Sukhikh B.I. Forest aviation and aerial photography. M., 1989. 366 p. (In Russ.)

History of forest management. URL: <https://dzen.ru/a/ZG8PqNXOWQODWgGY> (application march 31, 2024). (In Russ.)

Jarko V.O., Bartalev S.A., Egorov V.A. The use of PROBA-V satellite data to assess the stocks of stem wood in the Primorsky Territory. *Modern problems of remote sensing of the Earth from space* : All-Russian open conference. M.: IKI RAS, 2016, p. 368. (In Russ.)

Jirin V.M., Bartalev S.A., Ershov D.V. Spectrometric assessment of the condition of woody plants during forest monitoring. *Mathematical modeling and monitoring of forest ecosystems*, 1995. 14 p. (In Russ.)

Labutina I.A. Decoding aerospace images. M., 2004. 184 p. (In Russ.)

Lupyan E.A., Bartalev S.A., Tolpin V.A., Krashenninnikova Yu.S., Oksyukevich A.Yu. The possibilities and experience of using the Vega satellite service in the organization of regional remote monitoring. *Regional problems of remote sensing of the Earth* : mater. of the international scientific conference. Krasnoyarsk: NFU, 2014, pp. 3–6. (In Russ.)

Malisheva N.V. Automated decoding of aerospace images of forest plantations. M.: MSUF, 2012. 154 p. (In Russ.)

The order of the Ministry of Natural Resources of Russia № 510 от 05.08.2022 «On the approval of the Forest Management instruction». (In Russ.)

The order of the Federal Forestry Agency № 102 от 26.02.2024 «On approval of the Regulations for the organization and conduct of forest management meetings, collective (individual) trainings, quality control of forest management and the quality of preparation of forest management documentation, as well as approval of forest

management documentation in relation to forest taxation measures, design of forest conservation measures, design of forestry and invalidation of the order of the Federal Forestry Agency № 815 от 18.07.2023». (In Russ.)

Sidorenkov V.M., Kositsin V.N., Kalnin V.V., Kushnir O.V., Ribkin A.S. Current trends in the development of forest taxational decryption based on satellite imagery. *Forestry information*, 2019, no. 3, pp. 48–60. (In Russ.)

Sukhikh V.I. Aerospace methods in forestry and landscape construction: Textbook. Yoshkar-Ola: MarSTU, 2005. 392 p. (In Russ.)

Tolpin V.A., Balashov I.V., Efremov V.Yu., Lupyan E.A., Proshin A.A., Uvarov I.A., Flitman E.V. Creation of interfaces for working with data from modern remote monitoring systems (GEOSMIS). *Modern problems of remote sensing of the Earth from space*, 2011, vol. 8, no. 3, pp. 93–108. (In Russ.)

Chernyh V.V. Forest legislation under the reign of Paul I and the establishment of the Forest department. *Siberian Legal Bulletin*, 2018, no. 1 (80), pp. 23–32. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 15.04.2024

Капиталинин Д.Ю., Сидоренков В.М., Ачиколова Ю.С., Астапов Д.О., Рябцев О.В., Щекалев Р.В. Оценка качества таксации по результатам лесотаксационного дешифрирования данных спутниковой съемки Sentinel-2 // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 62–77. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.62-77

В статье рассматривается технология оценки качества материалов таксации леса на основе анализа связей таксационных показателей насаждений с их спектрально-отражательными характеристиками. При проведении исследований используются данные спутниковой съемки Sentinel-2 в видимом и инфракрасном диапазоне спектра с пространственным разрешением 10 м.

Ключевые слова: лесная таксация, лесоустройство, спутниковая съемка, дешифрирование.

Kapitalinin D.Yu., Sidorenkov V.M., Achikolova Yu.S., Astapov D.O., Ryabtsev O.V., Shchekalev R.V. Assessment of the quality of taxation based on the results of forest taxation decryption of Sentinel-2 satellite imagery data. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 62–77 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.62-77

The article considers the technology of assessing the quality of forest taxation materials based on the analysis of the relationship between the taxation indicators of plantations and their spectral-reflective characteristics. The research uses Sentinel-2 satellite imagery data in the visible and infrared spectral ranges with a spatial resolution of 10 m.

Key words: forest taxation, forest management, satellite imagery, decryption.

КАПИТАЛИНИН Дмитрий Юрьевич – начальник Департамента лесного хозяйства по Центральному Федеральному округу. ORCID: 0009-0001-5489-9192.

141202, Институтская ул., д.15, г. Пушкино, Московская обл., Россия.
E-mail: kapitalinin.d@yandex.ru

KAPITALININ Dmitry Yu. – Head of the Forestry Department for the Central Federal District. ORCID: 0009-0001-5489-9192.

141202, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russia. E-mail: kapitalinin.d@yandex.ru

СИДОРЕНКОВ Виктор Михайлович – заместитель директора по научной и инновационной деятельности Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-код: 6071-2570.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия.
E-mail: lesvn@yandex.ru

SIDORENKOV Viktor M. – PhD (Agriculture), Deputy director for research and innovation of the All-Russian scientific research institute of forestry and forestry mechanization. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-code: 6071-2570.

141202, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russia. E-mail: lesvn@yandex.ru

АЧИКОЛОВА Юлия Сергеевна – ведущий инженер лаборатории лесоустройства и лесной таксации Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-7937-5061. SPIN-код: 2270-4644.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия.
E-mail: pipintook@yandex.ru

ASHIKOLOVA Yuliya S. – Leading engineer of the Laboratory of forest management and forest taxation of the All-Russian scientific research institute of forestry and forestry mechanization. ORCID: 0000-0002-7937-5061. SPIN-code: 2270-4644.

141202, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russia. E-mail: pipintook@yandex.ru

АСТАПОВ Даниил Олегович – заведующий лабораторией лесоустройства и лесной таксации Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-код: 6489-9193.

141202, Институтская ул., д.15, г. Пушкино, Московская обл., Россия.
E-mail: astdann09@yandex.ru

ASTAPOV Daniil O. – head of the Laboratory of forest management and forest taxation of the All-Russian scientific research institute of forestry and forestry mechanization. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-code: 6489-9193.

141202, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russia. E-mail: astdann09@yandex.ru

РЯБЦЕВ Олег Викторович – заведующий отделом инновационных технологий, внедрения и лесного проектирования Всероссийского научно-исследовательского института лесоводства и механизации лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-код: 6803-9857.

141202, Институтская ул., д. 15, г. Пушкино, Московская обл., Россия. E-mail: sektorles@yandex.ru

RYABTSEV Oleg V. – PhD (Agriculture), Head of Department of innovative technologies, implementation and forest design of the All-Russian scientific research institute of forestry and forestry mechanization. ORCID: 0000-0003-4189-1906. SPIN-code: 6803-9857.

141202, Institutskaya str. 15, Pushkino, Moscow region, Russia. E-mail: sektorles@yandex.ru

ЩЕКАЛЕВ Роман Викторович – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0001-7657-1705. SPIN-код: 5826-3852.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: schekalevr@yandex.ru

SHCHEKALEV Roman V. – DSc (Agriculture), Professor of Forestry Department of St. Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-7657-1705. SPIN-code: 5826-3852.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: schekalevr@yandex.ru

А.А. Шишкина, Н.Н. Карпун

ВИДОВОЙ СОСТАВ ПАТОГЕННЫХ МИКРОМИЦЕТОВ НА ЛЕСОСЕМЕННЫХ ПЛАНТАЦИЯХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ В МОСКОВСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение. Сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris* L.) – одна из главных лесообразующих пород России. Ее ареал охватывает значительную часть территории страны. Ежегодно сосновые леса подвергаются воздействию лесных пожаров, шквалистых ветров, вредных организмов, техногенного загрязнения и других неблагоприятных факторов, что влечет их гибель на больших площадях [Обзор ..., 2023]. Обширные вырубки остаются после проведения интенсивных промышленных рубок леса. Для восстановления ценных хвойных древостоев необходимо выращивание качественного посадочного материала [Лесной план ..., 2019].

В целях получения семян с улучшенными наследственными свойствами и сохранения генетического фонда высокопродуктивных насаждений была создана постоянная лесосеменная база объектов единого генетико-селекционного комплекса. Одним из его важнейших элементов являются лесосеменные плантации (ЛСП), созданные вегетативным потомством плюсовых деревьев, прошедших генетическую оценку (элитные деревья). Это особая форма насаждений, используемая для получения устойчивых урожаев семян с высокими наследственными и посевными качествами¹.

Однако как в России, так и в некоторых зарубежных странах нередко отмечаются случаи сильного ухудшения состояния молодых посадок сосны и снижения урожайности семян на ЛСП вследствие массового распространения патогенных микромицетов [Жуков и др., 2013; Ильичев, Шуваев, 2016; Drenkhan et al., 2016].

На территории Московской области ЛСП сосны обыкновенной расположены в Орехово-Зуевском лесничестве (восточная часть области) [Лес-

¹ Правила создания и выделения объектов лесного семеноводства (лесосеменных плантаций, постоянных лесосеменных участков и подобных объектов) [Приказ Минприроды России от 20.10.2015 № 438]. URL: <https://docs.cntd.ru/document/420314538#6500PL> (дата доступа: 23.12.2023).

ной план ..., 2019]. С 2017 г. на этих участках нами стало наблюдаться заметное ослабление деревьев, отмирание побегов и опадение шишек. Характер поражения и наличие массовых спороношений на пораженных органах свидетельствовали о наличии грибной инфекции.

Цель настоящего исследования заключалась в установлении видового состава патогенных микромицетов на территории лесосеменных плантаций сосны обыкновенной Орехово-Зуевского лесничества Московской области и определении их роли в изучаемых насаждениях.

Материалы и методика исследования. Исследования проведены в период с 2017 по 2023 гг. на территории Куровского участкового лесничества Орехово-Зуевского лесничества Московской области. Объектами изучения стали насаждения сосны обыкновенной на территории действующей ЛСП, а также на прилегающих к ней участках списанных ЛСП и естественных насаждений (рис. 1).

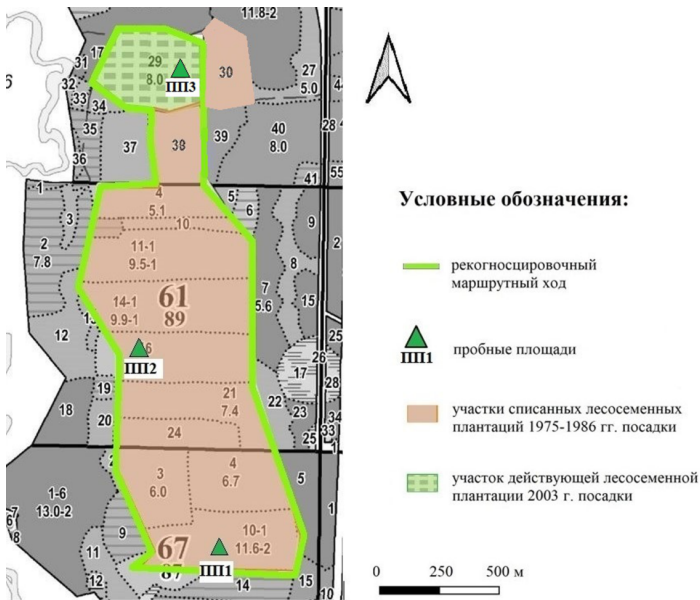


Рис. 1. Расположение лесосеменных плантаций в Куровском участковом лесничестве Орехово-Зуевского лесничества Московской области, 2023 г.

Fig. 1. Location of the forest seed plantations in the Kurovsky district forestry of the Orekhovo-Zuevsky forestry, Moscow region, 2023

Действующая ЛСП № 48 площадью 8,0 га была заложена в 2003 г. (рис. 1, 2а). Посадка рядовая с расстоянием 10 м между рядами и 5 м между деревьями в ряду. Текущая густота произрастания деревьев составляет 145 шт./га. В отличие от обычных лесных культур, на ЛСП применяется более редкая схема посадки деревьев с целью создания условий лучшей освещенности крон. Это способствует росту боковых ветвей и позволяет собирать большой урожай семян в течение длительного периода времени. Средняя высота деревьев – 8 м. Кроны хорошо развиты, их протяженность составляет 90–100%, за исключением пораженных грибными болезнями экземпляров, у которых в результате отмирания нижних ветвей протяженность кроны в среднем 75–80%. Расстояние до первой живой ветви – не более 0,5 м у деревьев без признаков болезни и до 1,5 м у больных экземпляров. Кроны в рядах частично сомкнуты, в междурядьях смыкания крон не отмечено. Диаметр проекции крон вдоль ряда в среднем составляет 4–6 м, поперек ряда – 6–8 м. Почвы дерново-неглубокоподзолистые, супесчаные, развитые на водно-ледниковых песках [Риджал, 2006]. Тип условий местопроизрастания В2 согласно типологии П.С. Погребняка [1955].



Рис. 2. Общий вид обследованных лесосеменных плантаций:

(а) действующей лесосеменной плантации № 48 (2003 г. посадки); (b) списанной лесосеменной плантации (1975 г. посадки). Фото А.А. Шишкиной

Fig. 2. General view of studied forest seed plantations: operating forest seed plantation No. 48, planted in 2003; (b) former forest seed plantation, planted in 1975.

Photo by A.A. Shishkina

Примыкающие с юга лесосеменные плантации 1975–1986 гг. посадки (рис. 1, 2b) были списаны по причине достижения деревьями высоты более 10 м, после чего они стали непригодными для заготовки лесосеменного

сырья. Общая площадь списанных плантаций составляет 74,7 га. Это молодняки II класса возраста или средневозрастные сосновые насаждения с участием в составе березы, средняя полнота – 0,6-0,7, 1-2 класс бонитета. Тип условий местопроизрастания В2. Посадка рядовая с расстоянием 10 м между рядами и 5-6 м между деревьями в ряду. Кроны в рядах сомкнуты, в междурядьях сомкнуты частично.

Естественные насаждения, примыкающие к ЛСП, представлены приспевающими и спелыми сосняками с участием в составе ели и березы, низкой полноты (0,3-0,5), 1-2 класса бонитета. Тип условий местопроизрастания В2-В3. На отдельных участках отмечено произрастание соснового подроста под основным пологом. Наиболее часто наблюдался групповой характер его распространения по площади, реже – равномерный.

Обследование и наблюдения проводили на рекогносцировочных маршрутных ходах с закладкой временных пробных площадей по непровешенной ходовой линии с перечетом не менее 100 деревьев. Санитарное состояние растений оценивалось по модифицированной классической 6-балльной шкале категорий состояния деревьев хвойных пород [Воронцов и др., 1991]. Состояние насаждений оценивалось по средневзвешенному значению категории состояния и определялось по критериям, приведенным в Правилах санитарной безопасности в лесах².

Дополнительно оценено поражение грибными болезнями соснового подроста. При обследовании подрост подразделяли на три группы по высоте: мелкий (до 1 м), средний (1-1,5 м) и крупный (выше 1,5 м) [Воронцов и др., 1991].

При выявлении признаков поражения грибными болезнями и отмирания ветвей на обследованных объектах отбирали образцы усыхающих и усохших ветвей, шишек и хвои из крон и опада для проведения фитопатологического анализа в лаборатории отдела защиты леса и экспедиционных работ ФБУ «Рослесозащита». При изучении микроструктур грибов использовали стереоскопический микроскоп МСП-1, бинокулярный микроскоп Micros MC 300 Austria, микрометр окулярный винтовой МОВ-1-15^х. Идентификация видов обнаруженных микромицетов проводилась с использованием отечественных и зарубежных определителей [Брежнев и др., 1962; Мельник, 1997; Карпун и др., 2021; Визначник ..., 1969, 1971; Minter, 1981; Sinclair, Lyon, 2005].

² Правила санитарной безопасности в лесах [Постановление Правительства Российской Федерации от 09.12.2020 № 2047]. Режим доступа: <https://docs.cntd.ru/document/573053313>. Дата доступа: 23.12.2023.

Оценка встречаемости микромицетов осуществлялась по собранным для анализа образцам по разработанной нами шкале:

- массовая встречаемость – споронотения отмечены на преобладающем количестве пораженных частей растений в образцах, расположены сплошь на пораженном субстрате;
- обычная встречаемость – споронотения отмечены на многих пораженных частях растений в образцах, расположены локально на пораженном субстрате;
- редкая встречаемость – споронотения отмечены на нескольких пораженных частях растений в образцах, расположены локально на пораженном субстрате;
- единичная встречаемость – споронотения отмечены на единичных пораженных частях растений в образцах, расположены локально на пораженном субстрате.

Молекулярно-генетический анализ отобранных образцов был проведен на базе лаборатории отдела мониторинга состояния лесных генетических ресурсов ФБУ «Рослесозащита» по общепринятой методике [Падутов и др., 2007] с применением генетического анализатора Applied Biosystems 3500.

Латинские наименования видов микромицетов указаны в соответствии с базой данных Index Fungorum [Index Fungorum, 2023].

Фотографии сделаны фотокамерами Canon EOS 1200D, Nikon Coolpix P330.

Результаты исследования. Средневзвешенная категория состояния насаждений действующей ЛСП составила 1,88, что позволило отнести насаждения к ослабленным (рис. 3а). Ухудшение санитарного состояния деревьев на ЛСП вызвано грибными болезнями и действием снеговала и снеголома. В результате поражения грибными болезнями происходит усыхание ветвей и хвои в нижней, реже – в средней части кроны. Встречаемость деревьев с усыханием побегов и хвои составляет 79%, степень поражения кроны варьирует от 1 до 30%, в среднем этот показатель составляет 8%. Полностью погибшие экземпляры не отмечены. В результате снеговала и снеголома у 10% сосен оказались искривлены или сломаны вершины и крупные скелетные ветви.

На списанных ЛСП средневзвешенная категория состояния составляет 1,33, санитарное состояние древостоев сосны оценено как здоровое (рис. 3б). Основная причина отпада – ветровал, бурелом, снеговал и снеголом прошлого и текущего года. Усыхание и деформация ветвей в результате поражения грибными болезнями отмечаются редко, однако сильная степень поражения с усыханием вершин и боковых побегов наблюдается у молодых сосен в подросте.

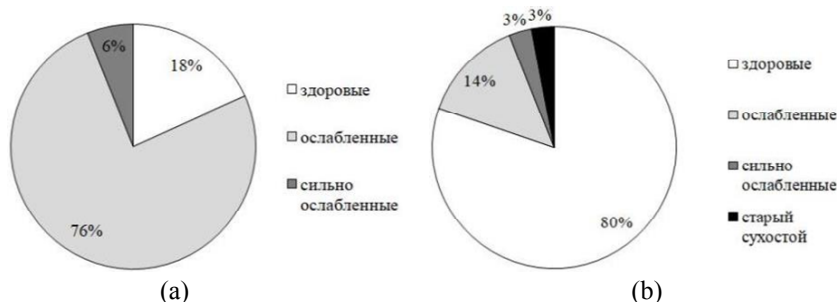


Рис. 3. Распределение деревьев по категориям санитарного состояния, %:
(a) действующая лесосеменная плантация; (b) списанные лесосеменные плантации

Fig. 3. Distribution of trees by categories of sanitary condition, %:
(a) operating forest seed plantation; (b) former forest seed plantations

На пораженных побегах, хвое и шишках сосны обыкновенной на обследованных ЛСП выявлено 19 видов дендротрофных микромицетов (табл. 1), из них 12 видов характеризуются высокой паразитической активностью, а остальные встречаются только на мертвом субстрате.

Таблица 1

Видовой состав микромицетов, выявленных на пораженных побегах и хвое сосны обыкновенной на обследованных лесосеменных плантациях Орехово-Зуевского лесничества. Московская обл., 2017–2023 гг.

Species list of dendrotrophic fungi, detected on affected shoots and needles on Scots pine on studied seed plantations of Orekhovo-Zuevsky forestry, Moscow region, 2017–2023

№ п/п	Название вида	Субстрат	Вызываемая болезнь	Встречаемость
1	<i>Alternaria</i> sp. Nees	Живые (в области некроза) и усохшие побеги	Черная плесень	Единичная
2	<i>Coleosporium</i> sp. Lév	Живая хвоя прошлых лет	Ржавчина хвои	Редкая
3	<i>Cladosporium</i> sp. Link	Усохшие побеги, усохшая хвоя прошлых лет	Темно-оливковая плесень	Единичная
4	<i>Cyclaneusma minus</i> (Butin) DiCosmo, Peredo & Minter (= <i>Naemocyclus minor</i> Butin)	Усохшая хвоя прошлых лет	Пожелтение хвои	Редкая
5	<i>Cytospora pinastri</i> Fr.	Усохшие побеги, усохшая хвоя прошлого года	Побурение хвои, некроз побегов	Единичная
6	* <i>Diaporthe eres</i> Nitschke (= <i>Sclerophoma pithya</i> (Sacc.))	Живые (в области некроза) и усохшие побеги, усохшая хвоя прошлых лет	Склерофомоз	Обычная

Окончание табл. 1

№ п/п	Название вида	Субстрат	Вызываемая болезнь	Встречаемость
7	<i>Dothistroma septosporum</i> (Dorogin) M. Morelet	Живая хвоя прошлых лет, усохшая хвоя в опаде	Красная пятнистость (дотистромоз) хвои	Обычная
8	* <i>Gremmeniella abietina</i> (Lagerb.) M. Morelet (= <i>Sclerodermis lagerbergii</i> Gremmen., <i>Brunchorstia pinea</i> (P. Karst.) Höhn., <i>Brunchorstia destruens</i> Erikss.)	Усохшие побеги, усохшая хвоя (от основания) прошлого года	Побеговый рак (= склеродерриоз)	Обычная
9	<i>Lasiodiplodia theobromae</i> (Pat.) Griffon & Maubl.	Усохшие побеги, усохшая хвоя прошлого года	Гниль семян, сеянцев	Единичная
10	<i>Leptostroma</i> Fr.	Усохшая хвоя прошлого года	Шютте	Обычная
11	<i>Lophodermium conigenum</i> (Brunaud) Hilitzer	Усохшая хвоя прошлого года	Шютте	Редкая
12	<i>Lophodermium pinastri</i> (Schrad.) Chevall.	Усохшая хвоя прошлых лет, усохшая хвоя в опаде	Шютте	Обычная
13	<i>Phacidium lacerum</i> Fr.	Усохшая хвоя прошлых лет	Шютте	Единичная
14	* <i>Sarea resinae</i> (Fr.) Kuntze (<i>Zythia resinae</i> (Fr.) P. Karst.)	Живые побеги и шишки (в области некроза и засмоления)	Некроз побегов, отмирание шишек	Единичная
15	<i>Sphaeropsis sapinea</i> (Fr.) Dyko & B. Sutton	Живые (в области некроза) и усохшие побеги, усохшая хвоя текущего и прошлых лет, живые (в области некроза) и опавшие шишки прошлого года	Диплодиоз (= сферопсисовый некроз), отмирание шишек	Массовая
16	* <i>Sydowia polyspora</i> (Bref. & Tavel) E. Müll. (= <i>Sclerophoma pithyophila</i> (Corda) Höhn)	Живые (в области некроза и засмоления) и усохшие побеги, усохшая хвоя текущего года и прошлых лет	Склерофомоз	Массовая
17	* <i>Thyronectria cucurbitula</i> (Tode) Jaklitsch & Voglmayr (= <i>Zythiostroma pinastri</i> (P. Karst.) Höhn., <i>Zythia pinastri</i> P. Karst.)	Усохшие побеги и почки, усыхающая (от основания) хвоя прошлого года	Тиронектриевый (= зитиевый) некроз побегов, побурение хвои, отмирание почек	Обычная
18	<i>Trichothecium roseum</i> (Pers.) Link	Опавшие шишки прошлого года	Розовая плесень семян, гибель семян, загнивание всходов	Редкая
19	<i>Truncatella hartigii</i> (Tubeuf) Steyaert	Усохшая хвоя прошлого года	Побурение хвои, некроз	Редкая

Примечание: * – отмечена только конидиальная стадия гриба.

Наибольшее распространение в обследованных насаждениях имеют возбудители некроза побегов – *G. abietina*, *S. sapinea*, *S. polyspora*, *D. eres* и *T. cucurbitula*, а также отмирания хвои – *D. septosporum* и *C. minus*.

Gremmeniella abietina (побеговый рак, или склеродерриоз) у деревьев на ЛСП приводит к отмиранию ветвей в нижней и средней части кроны. Заметное ослабление было отмечено только у единичных растений. Однако в 2022–2023 гг. отмечена тенденция увеличения числа больных сосен и повышения степени поражения крон.

G. abietina массово встречается в примыкающих насаждениях на подросте сосны. У растений наблюдается сильное ослабление, усыхание вершин и ветвей, иногда – полная гибель.

Sphaeropsis sapinea (диплодиоз) впервые был обнаружен на изучаемых объектах в 2017 г. на участке 1975 г. посадки, где он вызвал отмирание ветвей и опадение шишек [Шишкина и др., 2020]. В дальнейшем в ходе наблюдений было установлено, что *S. sapinea* является массовым видом на сосне на примыкающих участках и поражает растения всех возрастов, а также в качестве сапротрофа обильно заселяет мертвую кору, хвою и шишки на опавших ветвях.

На действующей ЛСП гриб *S. sapinea* развивается на побегах, хвое и шишках (рис. 4а, б), однако не оказывает заметного влияния на санитарное состояние 20-летних сосен. Для целей заготовки семян значительный вред заключается в поражении и преждевременном опадении шишек, семена в таких шишках не вызревают.

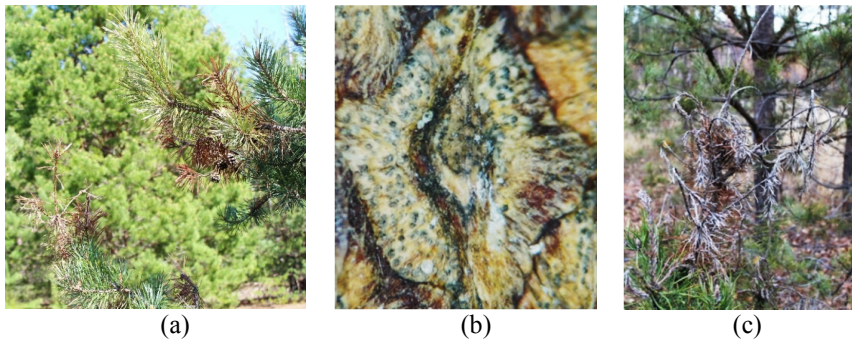


Рис. 4. Диплодиоз сосны обыкновенной: (а) общий вид пораженных ветвей; (б) спороношение (пикниды) *Sphaeropsis sapinea* на семенных чешуйках шишек; (с) погибший подрост. Фото А.А. Шишкиной

Fig. 4. Diplodia shoot blight of Scots pine: (a) general view of the affected branches; (b) sporulation (pycnidia) of *Sphaeropsis sapinea* on seed scales of cones; (c) dead undergrowth. Photo by A.A. Shishkina

На примыкающих к ЛСП участках у молодых сосен в подросте разного возраста и групп по высоте отмечается более заметное ослабление вследствие поражения диплодийозом. Заболевание приводит к искривлению и отмиранию центральных и боковых побегов (часто погибают едва тронувшиеся в рост побеги), многовершинности растений, в единичных случаях – к их полной гибели (рис. 4с). Гриб *S. sapinea* отмечен также на отдельных экземплярах можжевельника обыкновенного (*Juniperus communis* L.) в подлеске. Болезнь вызывает отмирание его побегов и хвои.

Thyronectria cucurbitula (тиронектриевый некроз) отмечен на соснах ЛСП, а также на среднем и крупном подросте на примыкающих участках. Заболевание приводит к усыханию побегов с симптомами, схожими с побеговым раком (рис. 5). *T. cucurbitula* является малоизученным видом, сведения о нем в Московской области до настоящих исследований отсутствовали.



Рис. 5. Тиронектриевый некроз сосны обыкновенной: (а) усохший побег; (б) спороношение (конидиомы) *Thyronectria cucurbitula* на отмерших почках.
Фото А.А. Шишкиной

Fig. 5. *Thyronectria* shoot blight of Scots pine: (a) dead shoot; (b) sporulation (conidiomata) of *Thyronectria cucurbitula* on dead buds. Photo by A.A. Shishkina

Sydowia polyspora и *Diaporthe eres* (склерофомоз) – часто встречающиеся виды, вызывающие усыхание побегов и хвои сосны на ЛСП и подросте разного возраста на примыкающих участках. Наличие *S. polyspora* было подтверждено методами ДНК-анализа при изучении засмоленных ран на ветвях сосен.

Dothistroma septosporum (дотистромоз) отмечен на ЛСП на тех же растениях, которые поражены побеговым раком. Также болезнь выявлена в

примыкающих насаждениях на молодых соснах первого класса возраста, относящихся преимущественно к подросту средней группы по высоте. Наиболее сильное развитие болезни наблюдается на освещенных частях крон. Поражается хвоя на приростах прошлых лет, она отличается от здоровой пестрой окраской (рис. 6). Идентификация вида *D. septosporum* подтверждена методом молекулярно-генетической диагностики.

Cyclaneusma minus (пожелтение хвои сосны) отмечена на ЛСП на отмирающей хвое на нижних ветвях (рис. 7). Пожелтение хвои приводит к ее преждевременному усыханию и опадению.



(a)



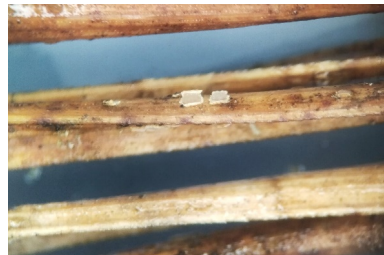
(b)

Рис. 6. Дотистромоз сосны обыкновенной: (a) общий вид пораженного подроста; (b) пораженная хвоя. Фото А.А. Шишкиной

Fig. 6. Dothistroma needle blight of Scots pine: (a) general view of the affected undergrowth; (b) affected needles. Photo by A.A. Shishkina



(a)



(b)

Рис. 7. Пожелтение хвои сосны обыкновенной: (a) пораженная хвоя; (b) плодовые тела (апотеции) *Cyclaneusma minus* на хвое. Фото А.А. Шишкиной

Fig. 7. Cyclaneusma needle blight of Scots pine: (a) affected needles; (b) fruiting bodies (apothecia) of *Cyclaneusma minus* on needles. Photo by A.A. Shishkina

Другие выявленные виды грибов (возбудители шютте и болезней других типов) отмечены в редких случаях на нижних ветвях или только на мертвом субстрате (на сломанных под тяжестью снега ветвях, оставшихся в кроне и опаде) и не имеют большого значения в насаждениях ЛСП.

Среди выявленных видов дендротрофных микромицетов к новым для ЛСП и малоизученным для Московской области можно отнести: *G. abietina*, *S. sapinea*, *D. septosporum*, *T. cucurbitula*, *S. polyspora*, *D. eres* и *C. minus*. Ранее сообщалось об отдельных находках в Московской области *G. abietina*, *S. sapinea*, *D. septosporum*, *S. polyspora* и *C. minus*, преимущественно в зеленых насаждениях и питомниках [Шероколава и др., 2008; Соколова, Колганихина, 2009; Жуков и др., 2013]. В некоторых случаях вызываемые этими микромицетами болезни приводят к сильному ослаблению, реже – к гибели сосны [Жуков и др., 2013; Давиденко, 2014; Карпун и др., 2021; Bihon et al., 2010; Drenkhan et al., 2016].

О находках *T. cucurbitula* ранее в регионе не сообщалось. Этот вид обычно встречается в опаде [Мельник, 1997; Федосова, Тобиас, 2012], однако известно о его способности при определенных условиях и наличии механических повреждений на хвое и побегах поражать живые ткани растений [Шевченко, 1978; Thytonectria..., 2023].

Установлено, что выявленные виды часто развиваются совместно на одном субстрате, заселяя один и тот же побег: *G. abietina* и *T. cucurbitula*, *G. abietina* и *S. polyspora*, *G. abietina* и *S. sapinea*, *G. abietina* и *D. septosporum*, *S. polyspora* и *S. sapinea*. Комплексы фитопатогенных грибов обычно отличаются большей вредоносностью по сравнению с моноинфекциями, вызываемыми патогенными грибами по отдельности [Давиденко, 2014; Drenkhan et al., 2016]. Проведенные нами обследования ЛСП за период с 2017 по 2023 гг. подтверждают этот вывод.

Распространению дендротрофных микромицетов в изученных насаждениях способствовал ряд неблагоприятных факторов, в т.ч. повреждение осадками и насекомыми-вредителями. Известно, что механические повреждения в результате снеголома, града и др. могут способствовать внедрению спор патогенных грибов и заражению деревьев [Sinclair, Lyon, 2005]. Отмеченные нами на ЛСП сломанные под тяжестью снега вершины и ветви деревьев заселяются микромицетами, которые при благоприятных погодных условиях или ослаблении растений способны переходить с отмерших на живые ветви и вызывать их усыхание. Интенсивному поражению диплодиозом взрослых сосен на списанных ЛСП в 2017 г. могло способствовать объединение крон шелкопрядом-монашенкой (*Lymantria monacha* L.),

наблюдавшееся в предыдущие годы. Повреждение хвои вредителями способствует ее заражению патогенными грибами, так как споры проникают внутрь хвои через погрызы, наносимые гусеницами [Арапова, 1992].

Отмирание боковых ветвей в результате поражения патогенными микромицетами способно не только ослабить растения, но и сократить ростовые процессы в средней части кроны деревьев сосны, где формируется женское цветение и закладываются шишки [Риджал, 2006]. Вследствие этого поражение крон грибами *G. abietina*, *S. sapinea*, *D. septosporum* и др. приводит к снижению урожая семян.

Опасность может представлять способность патогенных микромицетов развиваться в растении-хозяине без проявления симптомов, т. е. выступать в роли эндофитов. Так, применение молекулярно-генетических методов позволило установить, что грибок *S. sapinea* может в латентной форме развиваться в шишках и семенах растений и быть перенесен на новые участки в ходе хозяйственной деятельности человека, как произошло на плантациях сосны в Южной Африке [Bihon et al., 2010]. Вопрос о возможности распространения инфекции с семенами требует дополнительного изучения.

Заключение. Проведенные в период с 2017 по 2023 гг. исследования на территории лесосеменных плантаций сосны обыкновенной в Орехово-Зуевском лесничестве Московской области показали, что основными факторами ослабления растений являются грибные болезни и повреждение снегом, ставшее причиной образования снеговала и снеголома.

По результатам анализа усыхающих и усохших побегов, хвои и шишек выявлено 19 видов дендротрофных микромицетов с разной степенью паразитической активности. Среди них наибольшее влияние на состояние растений оказывают возбудители некроза побегов: *Gremmeniella abietina* (побеговый рак), *Sphaeropsis sapinea* (диплодиоз), *Sydowia polyspora* и *Diaporthe eres* (склерофомоз), *Thyronectria cucurbitula* (тиронектриевый некроз), а также отмирания хвои – *Dothistroma septosporum* (дотистромоз) и *Cyclaneusma minus* (пожелтение хвои сосны).

Обнаруженные виды часто развиваются в насаждениях в комплексе: *G. abietina* и *T. cucurbitula*, *G. abietina* и *S. polyspora*, *G. abietina* и *S. sapinea*, *G. abietina* и *D. septosporum*, *S. polyspora* и *S. sapinea*.

Выявленные микромицеты приводят к отмиранию ветвей в нижней и средней части кроны, гибели шишек и снижению выхода семян. Уровень поражения сосен на ЛСП в настоящий период невысокий, однако распространение возбудителей заболеваний в примыкающих насаждениях способствует высокой вероятности их дальнейшего развития на ЛСП.

На основании полученных данных были разработаны рекомендации по проведению мероприятий по предотвращению распространения выявленных болезней, представляющих угрозу для санитарного состояния и урожая семян.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Арапова Н.Н. Структура и экологические особенности комплекса филлотрофных микромицетов в сосняках Казахстана: автореф. дисс. ... канд. биол. наук. М., 1992. 19 с.

Брежнев И.Е., Ибрагимов Г.Р., Потлайчук В.И. Определитель грибов на плодах и семенах древесных и кустарниковых пород. М.: Сельхозиздат, 1962. 415 с.

Воронцов А.И., Мозолева Е.Г., Соколова Э.С. Технология защиты леса. М.: Экология, 1991. 304 с.

Давиденко Е.В. К вопросу об изучении патогенных грибов сосновых насаждений юга Украины // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. Вып. 207. С. 164–170.

Жуков А.М., Гниненко Ю.И., Жуков П.Д. Опасные малоизученные болезни хвойных пород в лесах России. Пушкино: ВНИИЛМ, 2013. 128 с.

Ильичев Ю.Н., Шуваев Д.Н. Состояние клоновых объектов кедра сибирского *Pinus sibirica* Du Roi Республики Алтай: сохранность и перспективы селекции // Сибирский лесной журнал. 2016. № 5. С. 33–44.

Карпун Н.Н., Булгаков Т.С., Журавлева Е.Н. Атлас вредителей и болезней декоративных насаждений на юге России. Хвойные породы. Сочи: ФИЦ СНЦ РАН, 2021. 216 с.

Лесной план Московской области на 2019-2028 годы: [Постановление Губернатора Московской области от 21.03.2019 № 116-ПГ]. URL: <https://klh.mosreg.ru/download/document/13763148>. Дата доступа: 23.12.2023.

Мельник В.А. Класс Coelomycetes // Определитель грибов России. Вып. 1. Редкие и малоизвестные роды. СПб.: Санкт-Петербургская типография № 1 РАН, 1997. 280 с.

Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Российской Федерации за 2022 год. Пушкино, 2023. 323 с.

Падутов В.Е., Баранов О.Ю., Воронаев Е.В. Методы молекулярно-генетического анализа. Минск: Юнипол, 2007. 176 с.

Погребняк П.С. Основы лесной типологии. Киев: Изд-во АН УССР, 1955. 456 с.

Риджал И.Б. Влияние осадков сточных вод на продуктивность лесосеменных плантаций сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в зоне хвойно-широколиственных лесов: автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М., 2006. 20 с.

Соколова Э.С., Колганихина Г.Б. Грибные болезни древесных интродуцентов в насаждениях Москвы и Подмосквья // Лесной вестник. 2009. № 5. С. 145–153.

Федосова А.Г., Тобиас А.В. Микобиота хвои на некоторых островах Керетского архипелага (Белое море) // Вестник СПбГУ. Сер. 3. 2012. Вып. 4. С. 68–74.

Шевченко С.В. Лесная фитопатология. Львов: Вища школа, изд-во при Львов. ун-те, 1978. 320 с.

Шероколава Н.А., Скрипка О.В., Александров И.Н., Дудченко И.П., Сурина Т.А., Никифоров С.В. Патогенная микрофлора древесных культур в европейской части России // Современная микология в России. Т. 2: матер. II Съезда микологов России. М.: Национальная академия микологии, 2008. С. 215.

Шишкина А.А., Шишкина А.А., Некляев С.Э. Массовое усыхание побегов в молодых культурах сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Московской области // Лесохозяйственная информация. 2020. № 2. С. 66–88.

Визначник грибів України. Том II. Аскоміцети / под ред. Д.К. Зерова. Київ: Наукова думка, 1969. 520 с.

Визначник грибів України. Том III. Незавершені гриби / под ред. Д.К. Зерова. Київ: Наукова думка, 1971. 696 с.

Bihon W., Slippers B., Burgess T., Wingfield M.J., Wingfield B.D. Sources of *Diplodia pinea* endophytic infections in *Pinus patula* and *P. radiata* seedlings in South Africa // Forest Pathology. 2010. № 41(5). P. 370–375.

Drenkhan R., Tomešová-Haataja V., Fraser S., Bradshaw R.E., Vahalík P., Mullett M.S., Martín-García J., Bulman L.S., Wingfield M.J., Kirisits T., Cech T.L., Schmitz S., Baden R., Tubby K., Brown A., Georgieva M., Woods A., Ahumada R., Jankovský L., Thomsen I.M., Adamson K., Marçais B., Vuorinen M., Tsopelas P., Koltay A., Halasz A., La Porta N., Anselmi N., Kiesnere R., Markovskaja S., Kačergius A., Papazova-Anakieva I., Risteski M., Sotirovski K., Lazarević J., Solheim H., Boroń P., Bragança H., Chira D., Musolin D.L., Selikhovkin A.V., Bulgakov T.S., Keča N., Karadžić D., Galovic V., Pap P., Markovic M., Poljakovic-Pajnik L., Vasic V., Ondrušková E., Piškur B., Sadiković D., Diez J.J., Solla A., Millberg H., Stenlid J., Angst A., Queloz V., Lehtijärvi A., Doğmuş-Lehtijärvi H.T., Oskay F., Davydenko K., Meshkova V., Craig D., Woodward S., Barnes I. Global geographic distribution and host range of *Dothistroma* species: a comprehensive review // Forest Pathology. 2016. No. 46(5). P. 1–35.

Index Fungorum Partnership: база данных. 2023. URL: <https://indexfungorum.org/Index.htm> (дата доступа: 24.12.2023).

Minter D.W. *Lophodermium* on pines // Mycological Papers. 1981. № 147. P. 1–54.

Sinclair W.A., Lyon H.H. Diseases of trees and shrubs. Comstock publishing associates, a division of Cornell University press, 2005. 660 p.

Thyronectria cucurbitula (Tode) Jaklitsch & Voglmayr // Global Biodiversity Information Facility. 2023. URL: <https://www.gbif.org/species/7597285> (дата доступа: 23.12.2023).

References

Arapova N.N. Struktura i ekologicheskie osobennosti kompleksa fillotrofnih mikromicetov v sosnyakah Kazahstana: avtoref. diss. ... kand. biol. nauk. M., 1992. 19 p. (In Russ.)

Bihon W., Slippers B., Burgess T., Wingfield M.J., Wingfield B.D. Sources of *Diplodia pinea* endophytic infections in *Pinus patula* and *P. radiata* seedlings in South Africa. *Forest Pathology*, 2010, no. 41(5), pp. 370–375.

Brezhnev I.E., Ibragimov G.R., Potlajchuk V.I. *Opredelitel' gribov na plodah i semenah drevesnyh i kustarnikovyh porod.* M.: Sel'hozizdat, 1962. 415 p. (In Russ.)

Davidenko E.V. K voprosu ob izuchenii patogennyh gribov osnovnyh nasazhdenij yuga Ukrainy. *Izvestiya Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2014, iss. 207, pp. 164–170. (In Russ.)

Drenkhan R., Tomešová-Haataja V., Fraser S., Bradshaw R.E., Vahalík P., Mullett M.S., Martín-García J., Bulman L.S., Wingfield M.J., Kirisits T., Cech T.L., Schmitz S., Baden R., Tubby K., Brown A., Georgieva M., Woods A., Ahumada R., Jankovský L., Thomsen I.M., Adamson K., Marçais B., Vuorinen M., Tsopelas P., Koltay A., Halasz A., La Porta N., Anselmi N., Kiesner R., Markovskaja S., Kačergius A., Papazova-Anakieva I., Risteski M., Sotirovski K., Lazarević J., Solheim H., Boroń P., Bragança H., Chira D., Musolin D.L., Selikhovkin A.V., Bulgakov T.S., Keča N., Karadžić D., Galovic V., Pap P., Markovic M., Poljakovic-Pajnik L., Vasic V., Ondrušková E., Piškur B., Sadiković D., Diez J.J., Solla A., Millberg H., Stenlid J., Angst A., Queloz V., Lehtijärvi A., Doğmuş-Lehtijärvi H.T., Oskay F., Davydenko K., Meshkova V., Craig D., Woodward S., Barnes I. Global geographic distribution and host range of *Dothistroma* species: a comprehensive review. *Forest Pathology*, 2016, no. 46(5), pp. 1–35.

Fedosova A.G., Tobias A.V. Mikrobiota hvoi na nekotoryh ostrovah Keretskogo arhipelaga (Beloe more). *Vestnik SPbGU*, ser. 3, 2012, iss. 4, pp. 68–74. (In Russ.)

Il'ichev Yu.N., Shuvaev D.N. Sostoyanie klonovyh ob"ektov kedra sibirskogo *Pinus sibirica* Du Tour Respubliki Altaj: sohrannost' i perspektivy selekcii. *Sibirskij lesnoj zhurnal*, 2016, no. 5, pp. 33–44. (In Russ.)

Index Fungorum Partnership: baza dannyh. 2023. URL: <https://indexfungorum.org/Index.htm> (accessed December 24, 2023).

Karpun N.N., Bulgakov T.S., Zhuravleva E.N. Atlas vreditelej i boleznej dekorativnyh nasazhdenij na yuge Rossii. Hvojnye porody. Sochi: FIC SNC RAN, 2021. 216 p. (In Russ.)

Lesnoj plan Moskovskoj oblasti na 2019–2028 gody: [Postanovlenie Gubernatora Moskovskoj oblasti ot 21.03.2019 No. 116-PG]. URL: <https://klh.mosreg.ru/download/document/13763148> (accessed December 23, 2023). (In Russ.)

Mel'nik V.A. Klass Coelomycetes. *Opredelitel' gribov Rossii. Iss. 1. Redkie i maloizvestnye rody.* SPb.: Sankt-Peterburgskaya tipografiya no. 1 RAN, 1997. 280 p. (In Russ.)

- Minter D.W. *Lophodermium* on pines. *Mycological Papers*, 1981, no. 147, pp. 1–54.
- Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Российской Федерации за 2022 год. Pushkino, 2023. 323 p. (In Russ.)
- Padutov V.E., Baranov O.Yu., Voropaev E.V. *Metody molekulyarno-geneticheskogo analiza*. Minsk: Yunipol, 2007. 176 p. (In Russ.)
- Pogrebnyak P.S. *Osnovy lesnoj tipologii*. Kiev: Izd-vo AN USSR, 1955. 456 p. (In Russ.)
- Ridzhal I.B. *Vliyanie osadkov stochnyh vod na produktivnost' lesosemennyyh plantacij sosny obyknovЕННОj (Pinus sylvestris L.) v zone hvojno-shirokolistvennyh lesov*: avtoref. diss. ... kand. s.- h. nauk. M., 2006. 20 p. (In Russ.)
- Sherokolava N.A., Skripka O.V., Aleksandrov I.N., Dudchenko I.P., Surina T.A., Nikiforov S.V. *Patogennaya mikroflora drevesnyh kul'tur v Evropejskoj chasti Rossii. Sovremennaya mikologiya v Rossii*. T. 2: mater. II S"ezda mikologov Rossii. M.: Nacional'naya akademiya mikologii, 2008, p. 215. (In Russ.)
- Shevchenko S.V. *Lesnaya fitopatologiya*. L'vov: Vishcha shkola, izd-vo pri L'vov. un-te, 1978. 320 p. (In Russ.)
- Shishkina A.A., Shishkina A.A., Neklyayev S.E. *Massovoe usyhanie pobegov v molodyh kul'turah sosny obyknovЕННОj (Pinus sylvestris L.) v Moskovskoj oblasti. Lesohozyajstvennaya informatsiya*, 2020, no. 2, pp. 66–88. (In Russ.)
- Sinclair W.A., Lyon H.H. *Diseases of trees and shrubs*. Comstock publishing associates, a division of Cornell University press, 2005. 660 p.
- Sokolova E.S., Kolganihina G.B. *Gribnye bolezni drevesnyh introducentov v nasazhdeniyah Moskvy i Podmoskov'ya. Lesnoj vestnik*, 2009, no. 5, pp. 145–153. (In Russ.)
- Thyronectria cucurbitula* (Tode) Jaklitsch & Voglmayr. *Global Biodiversity Information Facility*. 2023. URL: <https://www.gbif.org/species/7597285> (accessed December 23, 2023).
- Viznachnik gribiv Ukraini. Vol. II. Askomiceti / pod red. D.K. Zerova. Kiiv: Naukova dumka, 1969. 520 p. (In Ukr.)
- Viznachnik gribiv Ukraini. Vol. III. Nezaversheni gribi / pod red. D.K. Zerova. Kiiv: Naukova dumka, 1971. 696 p. (In Ukr.)
- Voroncov A.I., Mozolevskaya E.G., Sokolova E.S. *Tekhnologiya zashchity lesa*. M.: Ekologiya, 1991. 304 p. (In Russ.)
- Zhukov A.M., Gninenko Yu.I., Zhukov P.D. *Opasnye maloizuchennyye bolezni hvoynyh porod v lesah Rossii*. Pushkino: VNIILM, 2013. 128 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 21.03.2024

Шишкина А.А., Карпун Н.Н. Видовой состав патогенных микромицетов на лесосеменных плантациях сосны обыкновенной в Московской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 78–96. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.78-96

Лесосеменные плантации сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) в Орехово-Зуевском лесничестве Московской области являются одними из важнейших объектов для получения семян этой породы с улучшенными наследственными свойствами и сохранения генетического фонда высокопродуктивных насаждений в России. Впервые для этого объекта изучено санитарное состояние выращиваемых растений и установлен видовой состав патогенных микромицетов, развивающихся на усыхающих побегах, хвое, ветвях и шишках. Данные получены за период наблюдений с 2017 по 2023 гг. По результатам проведенных исследований выявлено 19 видов микромицетов, из них наиболее широкое распространение имеют возбудители некроза побегов и отмирания хвои *Gremmeniella abietina* (побеговый рак), *Sphaeropsis sapinea* (диплодиоз), *Sclerophoma pithya* (склерофомоз) и *Thyronectria cucurbitula* (тиронектриевый некроз), а также возбудители отмирания хвои – *Dothistroma septosporum* (дотистромоз, или красная пятнистость хвои) и *Cyclaneusma minus* (пожелтение хвои). Обнаруженные виды являются новыми для обследованных лесосеменных плантаций и малоизученными в Московской области. О находках *T. cucurbitula* ранее в регионе не сообщалось. В результате комплексного поражения этими видами отмечается ухудшение санитарного состояния, отмирание ветвей в нижней и средней части кроны, гибель шишек и снижение выхода семян. Выявлено сильное поражение подроста сосны в примыкающих естественных насаждениях и на списанных лесосеменных плантациях. На молодых растениях отмечено развитие побегового рака, а также диплодиоза, тиронектриевого некроза и дотистромоза, приводящее к отмиранию вершин, побегов, и резе целых растений. Наряду с сосной среди пораженных *S. sapinea* растений в примыкающих участках отмечен можжевельник обыкновенный (*Juniperus communis* L.), произрастающий в подлеске. Распространение возбудителей этих заболеваний в смежных насаждениях способствует высокой вероятности их дальнейшего развития на соснах лесосеменной плантации.

Ключевые слова: малоизученные микромицеты, грибные болезни сосны, *Pinus sylvestris*, *Gremmeniella abietina*, *Dothistroma septosporum*, *Sphaeropsis sapinea*, *Thyronectria cucurbitula*, *Cyclaneusma minus*.

Shishkina A.A., Karpun N.N. Species list of pathogenic micromycetes on seed plantations of Scots pine in the Moscow region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnickeskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 78–96 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.78-96

Forest seed plantations of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) in the Orekhovo-Zuevsky forestry of the Moscow region are one of the most important objects for obtaining seeds of this species with improved hereditary properties and preserving the genetic fund of highly productive plantings in Russia. For the first time for this object, the sanitary

condition of cultivated plants was studied and the species list of pathogenic micromycetes developing on dying shoots, needles, branches and cones was established. Data were obtained for the observation period from 2017 to 2023. According to the results of the study, 19 species of micromycetes were identified, the most widespread are the causative agents of shoot blight and needle cast: *Gremmeniella abietina* (Scleroderris canker), *Sphaeropsis sapinea* (Diplodia shoot blight), *Sclerophoma pithya* (Sclerophoma shoot blight) and *Thyronectria cucurbitula* (Thyronectria shoot blight), as well as the causative agents of needle cast – *Dothistroma septosporum* (Dothistroma needle blight or red band needle cast) and *Cyclaneusma minus* (Cyclaneusma needle cast). The identified species are new for the surveyed forest seed plantations and insufficiently studied in the Moscow region. *T. cucurbitula* have not previously been reported in the region. As a result of complex development of these species, there is a decline in sanitary condition, shoot blight in the lower and the middle parts of the crown, the loss of cones and a decrease in seed yield. Severe damage to pine undergrowth was revealed in adjacent natural plantations and on annulled forest seed plantations. On young plants, the development of shoot canker, as well as Diplodia shoot blight, Thyronectria shoot blight and Dothistroma needle blight, leading to the death of tops, shoots, and, less often, entire plants, was noted. Along with pine, among the plants affected by *S. sapinea* in the adjacent areas common juniper (*Juniperus communis* L.) in undergrowth was noted. The occurrence of pathogens of these diseases in adjacent plantings contributes to a high risk of their further spread on pines of the forest seed plantation.

Key words: insufficiently studied micromycetes, pine fungal diseases, *Pinus sylvestris*, *Gremmeniella abietina*, *Dothistroma septosporum*, *Sphaeropsis sapinea*, *Thyronectria cucurbitula*, *Cyclaneusma minus*.

ШИШКИНА Анна Александровна – соискатель кафедры защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова; инженер отдела защиты леса и экспедиционных работ ФБУ «Российский центр защиты леса». ORCID: 0009-0008-7470-5472.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия; 141207, ул. Надсоновская, д. 13, г. Пушкино, Московская обл., Россия. E-mail: asarum89@yandex.ru

SHISHKINA Anna A. – Applicant of the Department of Forest Protection, Timber Science and Game Science St.Petersburg State Forest Technical University; engineer of the Forest Protection and Expeditionary Work Department of the Russian Forest Protection Center. ORCID: 0009-0008-7470-5472.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia; 141207. Nadsonovskaya str. 13. Pushkino. Moscow region. Russia. E-mail: asarum89@yandex.ru

КАРПУН Наталья Николаевна – профессор кафедры защиты леса, древесиноведения и охотоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор биологических наук, доцент; главный научный сотрудник отдела защиты растений Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный исследовательский центр «Субтропический научный центр Российской академии наук». SPIN-код: 7293-8389. ORCID: 0000-0002-7696-3618. Web of Science: U-1502-2019. Scopus: 56955491500.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия; 354002, ул. Яна Фабрициуса, д. 2/28, г. Сочи, Россия. E-mail: nkolem@mail.ru

KARPUN Natalia N. – DSc (Biological), Professor of the Department of Forest Protection, Timber Science and Hunting, St.Petersburg State Forest Technical University, Associate Professor; chief Researcher, Plant Protection Department, Federal Research Centre «Subtropical Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences». SPIN-code: 7293-8389. ORCID: 0000-0002-7696-3618. Web of Science: U-1502-2019. Scopus: 56955491500.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia; 354002. Yana Fabritsiusa str. 2/28. Sochi. Russia. E-mail: nkolem@mail.ru

Д.А. Данилов, А.А. Яковлев, Д.А. Зайцев, А.А. Иванов

ИЗМЕНЕНИЯ В ПОСТАГРОГЕННЫХ ПОЧВАХ В ХОДЕ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ДРЕВЕСНОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В УСЛОВИЯХ ЮГО-ЗАПАДА ЛЕНИНГРАДСКОЙ ОБЛАСТИ

Введение. В последние десятилетия наблюдается значительное сокращение площадей пахотных земель; данный процесс имеет повсеместный устойчивый характер в бореальной зоне как на территории России [Kalinina et al., 2019; Anpilogova, Pakina, 2022], так и в других странах мира, особенно на территории умеренного пояса [Susyan et al., 2011; Spohn et al., 2015; Kukuş et al., 2019; Segura et al., 2020]. Данный процесс связан с глубокими экономическими и социальными изменениями, произошедшими в последние десятилетия конца XX и начале XXI веков. На вышедших из активного сельскохозяйственного пользования землях начинается процесс восстановления лесной аборигенной растительности [Люри и др., 2010; Карпин и др., 2017; Государственный (национальный) доклад ..., 2020; Захарченко и др., 2021; Данилов и др., 2023; Danilov et al., 2020]. Вследствие процесса восстановления естественного растительного покрова на постагрогенных территориях происходят изменения в экологических функциях почвы и в почвообразовательном процессе, которые в свою очередь ведут к эволюционным изменениям во всем почвенном комплексе. В ряде исследований отмечается влияние растительного покрова на изменения, происходящие в микробном сообществе и восстановление его естественного баланса [Курганова и др., 2018; Susyan et al., 2011; Gunina et al., 2018; Lopes de Gerenyu et al., 2018; Ovsepyan et al., 2019]. Изменения в постагрогенных почвах идут в направлении к состоянию, максимально приближенному к ненарушенному [Апарин, 1992; Шафран и др., 2021; Бурдуковский, Перепелкина, 2022; Литвинович и др., 2022; Kukuş et al., 2019; Anpilogova, Pakina, 2022]. В ходе восстановительной сукцессии в первую очередь эти изменения затрагивают агрохимические, физические и биологические свойства почвы. Почвенное плодородие на бывших пахотных землях в значительной степени зависит от истории использования залежных территорий; почвенные условия будут определять последующую смену и развитие растительного покрова [Захарченко и др., 2021; Spohn et al., 2015; Kalinina et al., 2019; Kukuş et al., 2019; Danilov et al., 2020]. Анализ исследований по данной проблематике показывает, что изу-

чение изменений почвенных условий в ходе сукцессии древесно-кустарниковой растительности постагрогенных земель является актуальным не только для России, но и для других стран мира.

В связи со сложностью и большим количеством факторов, влияющих на такой объект исследования, как антропогенно нарушенная почва, в научной литературе, освещающей вопросы взаимоотношений почвенного комплекса и естественной растительности, встречаются данные и результаты, которые противоречат друг другу, что свидетельствует о необходимости продолжения проведения исследований в данном направлении. Вследствие этого целью проводимого исследования было выявление закономерностей почвенного состояния под растительностью начальных сукцессионных стадий постагрогенных почв.

Материалы и методика исследования. Ленинградская область входит в состав двух физико-географических стран: Фенноскандии (страны Балтийского щита) и Русской (Восточно-Европейской) платформенной равнины. В зональном ряду вся территория области относится к бореальной (таежной) зоне Евразии. По лесорастительному районированию она принадлежит к Балтийско-Белозерскому таежному району. Сельскохозяйственные угодья в Ленинградской области занимают 20,3% от общей территории, их площадь составляет 223 тыс. га. Однако по данным учёта службы картографии и кадастра более 30% земель сельскохозяйственного назначения заросли древесно-кустарниковой растительностью [Доклад о состоянии ..., 2020].

Объекты исследования располагаются на юго-западе Ленинградской области в Гатчинском районе [Данилов и др., 2023; Danilov et al., 2020]. Участки приурочены к постагрогенным землям на плакорных возвышенностях Оредежского плато, которые примыкают к бассейну реки Оредеж. Почвы на данных участках сформированы на двучленных отложениях и представляют собой супесчано-суглинистый нанос на красноцветном валунном суглинке. Данные почвы характерны для района исследования и занимают свыше 40% территории земель сельскохозяйственного назначения и лесного фонда [Пестряков, 1973; Чертов, 1981].

Для создания хронологического ряда были подобраны участки с различным сроком залежи и стадий восстановительной сукцессии. Район исследования характеризуется давним сроком сельскохозяйственной освоенности. Срок сельскохозяйственного использования первых трех опытных участков составляет более 200 лет, что было установлено по картам Царскосельского уезда Петербургской губернии Российской империи конца XVIII века. Срок залежи первых двух участков составляет 25 лет. Первый участок представляет собой густое возобновление лиственных пород, а

второй участок разрежен из-за пирогенного воздействия и отличается присутствием возобновления хвойных пород (сосны и ели) (табл. 1). Третий участок имеет срок залежи 5 лет и представляет собой начальное, низкостовольное возобновление лиственных пород; последней выращиваемой сельскохозяйственной культурой на данном участке являлся райграс однолетний. Срок залежи четвертого участка составляет 10 лет, он представляет собой возобновление из лиственных пород; последней выращиваемой сельскохозяйственной культурой был картофель.

Таблица 1

**Таксационные характеристики древесной растительности
на бывших пахотных участках**

Taxation characteristics of woody cover on previously arable sites

Срок залежности участка, лет		Порода	Кэффиц. состава	Д _{ср.} , см	Н _{ср.} , м	Возраст, лет	Численность, экз. на 1 га
5 лет		С*	0,6	–	0,6	3	242
		Е	0,3	–	0,6	3	121
		Б	5,8	–	0,7	3	2424
		Ив	3,3	–	0,7	3	1394
10 лет		Б	2,2	2,6	3,7	7	2125
		Ос	0,4	1,2	2,0	4	375
		Ив древ.	1,6	1,7	2,8	5	1500
		Ив куст.	5,8	2,2	3,2	5	5563
25 лет	Лиственный древостой	Б	3,2	6,0	7,7	15	2200
		Ос	0,4	3,9	5,6	10	275
		Ив древ.	3,6	4,2	6,4	10	2463
		Ив куст.	2,8	2,4	3,6	10	1950
	Древостой с наличием хвойных пород	С	0,2	2,4	2,7	9	32
		Е	0,2	0,6	0,8	6	36
		Б	1,3	4,7	6,8	15	268
		Ос	2,6	3,9	5,9	10	556
		Ив древ.	2,9	4,0	5,7	10	592
		Ив куст.	2,8	2,9	4,4	10	580

Примечание: *здесь и далее С – сосна обыкновенная, *Pinus sylvestris* L.; Е – ель европейская, *Picea abies* (L.) Karst.; Б – береза, *Betula* sp.; Ос – осина обыкновенная, *Populus tremula* L.; Ив – ива, *Salix* sp.; Ив куст. – ива кустовидная; Ив древ. – ива древовидная.

На опытных участках постагрогенных земель в древесном возобновлении закладывались ходовые линии с расстоянием 17 метров между учетными площадками. На учетных площадках производилась таксация возобновления древесной растительности и отбор почвенных образцов для изучения агрохимических характеристик. Таксация возобновления проводилась на площадках постоянного радиуса (10 м^2) по общепринятым в лесоводстве методам при помощи мерной вилки Haglof и высотомера Suunto. Измерение диаметра у деревьев высотой более двух метров производилось на уровне 1,3 м от уровня почвы, а у деревьев ниже – на уровне корневой шейки.

Для описания почв и отбора почвенных образцов на опытных участках закладывались почвенные разрезы и прикопки [Апарин, 2012]. Морфологическое описание и название почв производились для постагрогенных участков с использованием Классификации и диагностики почв СССР [1977] и Классификации и диагностики почв России [2004].

Рассмотрение почвенных показателей проводилось по горизонтам – бывшему пахотному и бывшему подпахотному. Из агрохимических показателей почв определялись: содержание гумуса, нитратного азота, общего азота, подвижных форм фосфора и калия, гидролитическая кислотность, сумма обменных оснований, степень насыщенности основаниями, реакция среды pH. Все агрохимические анализы проводились в нескольких повторностях для получения достоверных результатов [Агрохимия, 2017].

Содержание гумуса определялось по методу И.В. Тюрина. Общий азот в почве определялся по методу Кьельдаля. Подвижный фосфор (P_2O_5) определялся по методу А.Т. Кирсанова. Количественное содержание подвижного фосфора подсчитывали на электрофотоколориметре по интенсивности окраски фосфорно-молибденовой сини. Подвижный калий (K_2O) определялся по методу А.Т. Кирсанова с последующим определением содержания калия на пламенном фотометре. Гидролитическая кислотность (ГК) почв определялась по методу Г. Каппена. Величина pH почвы определялась потенциометрически в водной и солевой (KCl) суспензии [Агрохимия, 2017].

В качестве основного показателя плодородия почв и скорости минерализации органического вещества использовалось соотношение C:N, которое рассчитывалось как процентное отношение углерода органического вещества почвы к содержанию общего азота. Оптимальным для почвы считается соотношение C:N, равное 12 [Тюрин, 1956].

На опытных участках, расположенных на постагрогенных территориях, помимо агрохимических характеристик почвы определялось почвен-

ное дыхание (скорость эмиссии CO_2) и микробиологическая активность. Оба данных показателя характеризуют активность почвенных микроорганизмов и являются показателями скорости минерализации органического вещества почвы. Для сравнения динамики данных показателей в сукцессионном ряду помимо основных четырех постагrogenных участков был заложен опыт на свежеспаханном поле со схожими почвенными условиями. Скорость эмиссии углекислого газа определялась на основе метода В.И. Штатнова. Данный метод основывается на способности щелочи (NaOH) поглощать углекислый газ. Количество углекислого газа, выделенного почвой в единицу времени, высчитывалось с учетом содержания CO_2 в воздухе герметичных сосудов по контрольному сосуду [Агрохимия, 2017].

Биологическая активность почвенных микроорганизмов определялась по методу, предложенному академиком Е.Н. Мишустиним. Данный метод характеризует скорость разложения целлюлозы почвенными микроорганизмами. Для определения биологической активности микроорганизмов брались полосы шириной 10 см неотбеленной грубой льняной ткани и пришивались на пластиковую сетку. Затем определялся вес абсолютно сухих льняных полос. Полосы ткани с известным весом закапывались в середину гумусового горизонта на объектах исследования. После 30 дней экспозиции льняные полосы выкапывались и в лабораторных условиях отмывались, сушились до абсолютно сухого состояния и взвешивались. По разнице массы определялась интенсивность разложения целлюлозы, которая характеризует биологическую активность почвенных микроорганизмов [Мишустин, Петрова, 1963].

Общее микробное число (ОМЧ) показывает общее количество микроорганизмов в 1 г почвы. Единицей измерения ОМЧ является колониеобразующая единица (КОЕ). Для определения ОМЧ делается серия посевов из заранее приготовленных разведений. В каждую чашку Петри на питательную среду равномерно наносится 1 мл раствора стерильной пипеткой. Затем чашки выдерживаются в термостате 24 часа при температуре 37°C . Спустя сутки чашки вынимаются из термостата, и производится подсчет всех колоний микроорганизмов в наиболее пригодной для этого чашке. Затем производится перерасчет количества колоний на 1 г почвы согласно концентрации разведения, по посеву которого определялся показатель.

Для определения почвенных микромицетов производится посев в чашки Петри на специализированные среды из тех же разведений, что и для ОМЧ. Время экспозиции может составлять до 72 часов. Затем полу-

ченный материал микроскопируется для определения родовой или видовой принадлежности почвенных грибов.

Определение общего микробного числа и почвенных микромицетов производилось с помощью экспресс-тестов «Петритест». Также необходимо указать, что к моменту отбора почвенных проб для определения показателей биологической активности почв опытный участок со сроком залежи 5 лет был распахан и засеян овсом.

Для установления и оценки влияния различных абиотических и биотических факторов на компоненты биогеоценоза и влияния его частей друг на друга было рассчитано значение корреляции по Пирсону. Оценка тесноты корреляционной связи производилась с использованием таблицы Чеддока. Для установления наличия связи между различными факторами и признаками применялся однофакторный дисперсионный анализ. Определение значимости F -критерия производилось по стандартным таблицам. Влияние фактора является статистически достоверным, когда расчетное значение F -критерия превышает табличное. Для исследования взаимодействий в почве дисперсионный анализ проводился на 10% доверительном интервале.

Описание совокупности полевых и лабораторных данных проводилось с использованием инструментов описательной статистики. Для характеристики разброса выборки рассчитывались: среднеквадратичное отклонение, коэффициент вариации, коэффициенты асимметрии и эксцесса. Для всех расчетов использовались программа Microsoft Excel 2007 и статистический пакет Statgraphics Centurion 18.

Результаты исследования. Почвенный покров территорий исследуемого массива, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, сложен почвами, относящимися к постлитогенным почвам, к отделам альфегумусовых почв и агроземов. Преобладающими почвами на исследуемых участках, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, являлись: постагрогенные средне- и глубокопахотные агроземы иллювиально-железистые, супесчано-суглинистые контактно-глееватые на двучленном наносе; постагрогенные среднепахотные неглубокоосветленные агродерново-подзолы альфегумусовые, супесчано-суглинистые контактно-глееватые на двучленном наносе [Классификация..., 2004] (или сильноокультуренные дерново-подзолистые иллювиально-железистые, супесчано-суглинистые контактно-глееватые на двучленном наносе; сильноокультуренные слабо-подзолистые иллювиально-железистые, супесчано-суглинистые контактно-глееватые на двучленном наносе [Классификация..., 1977]).

Средняя глубина бывшего пахотного горизонта почв исследуемых участков составляет 30 см. На всей площади исследуемых постагrogenных участков разного срока залежи в окультуренном горизонте полностью отсутствует плужная подошва или ее следы. Структура данного горизонта на всех участках представлена структурными отдельностями кубовидного типа; среди них преимущественно преобладают комковатые и зернистые отдельности. На участках с густым возобновлением древесных пород начинает формироваться и накапливаться подстилочный горизонт.

В срединных иллювиальных горизонтах наблюдается большое количество железистых новообразований в виде железистых дробовинок, представляющих собой гидрооксиды железа. Сам двучленный нанос можно отнести к мало контрастному по гранулометрическому составу, так как разница между кроющим и подстилающим слоями составляет одну ступень классификации (супесь подстилает суглинок). По мощности поверхностных отложений на исследуемых участках преобладают маломощные (глубина зоны контакта до 50 см) и среднемощные (глубина зоны контакта 50-80 см) двучленные наносы. Кроющий супесчаный нанос значительно изменен почвообразовательными процессами. Подстилающий суглинистый слой затронут процессом оглеения. Смена пород совпадает с нижней границей иллювиальных горизонтов.

Бывший пахотный горизонт постагrogenных почв исследуемых участков в целом характеризуется среднекислой реакцией среды (pH_{KCl} находится в пределах 4,6–5,0), кроме участка со сроком залежи 25 лет с густым листовым возобновлением: на нем почва имеет сильнокислую реакцию среды (pH_{KCl} находится в пределах 4,1–4,5) (табл. 2.). По содержанию гумуса участки с залежью 5 и 25 лет с наличием хвойного подроста являются среднеобеспеченными (содержание гумуса 3–4%). Наибольшим содержанием гумуса обладает участок с залежью 25 лет с густым листовым возобновлением (является хорошо обеспеченным), а наименьшее содержание органического вещества наблюдается на поле с залежью 10 лет (по степени обеспеченности гумусом является бедным). По содержанию подвижного фосфора участки с залежью 5 и 10 лет являются высокообеспеченными, а участки со сроком залежи 25 лет – низкообеспеченными. Все постагrogenные участки, кроме участка со сроком залежи 10 лет, по содержанию подвижного калия являются низкообеспеченными, а 10-летний участок является среднеобеспеченным. Наибольшее содержание общего азота наблюдается у участка со сроком залежи 10 лет, а наименьшее – у поля залежью 25 лет с разреженным возобновлением с наличием хвойных пород.

Соотношение C:N характеризует скорость минерализации гумуса. Наименьшее значение наблюдается на участке с залежью 10 лет. Это свидетельствует о том, что в данных почвах скорость минерализации органического вещества значительно превышает скорость его накопления. Также довольно низкое значение данного показателя у поля со сроком залежи 5 лет, что, возможно, является характерным для бывших пахотных земель с небольшим сроком залежи. На участках с залежью 25 лет соотношение C:N имеет более высокие значения, что свидетельствует об ускорении процесса накопления гумуса или о снижении скорости его минерализации. Данная разница показателей соотношения C:N у постагрогенных территорий с небольшим сроком залежи и участков с более давней залежью, вероятно, связана с изменениями в почвенном комплексе, а именно в процессах накопления и минерализации гумуса. Данные изменения, скорее всего, обусловлены сменами растительных сообществ и увеличением доли влияния древесных пород.

Таблица 2

**Агрохимическая характеристика постагрогенных почв
на объектах исследования**

Agro-chemical characterization of postagricultural soils at the study sites

Срок залежи		Гумус, %	N, %	C:N	P ₂ O ₅ , мг/100 г	K ₂ O, мг/100 г	pH _{KCl}
5 лет		3,47 ±0,08	0,36 ±0,001	5,56 ±0,10	22,36 ±0,28	5,39 ±0,10	4,83 ±0,04
10 лет		1,03 ±0,06	0,42 ±0,003	2,63 ±0,08	27,50 ±0,06	10,94 ±0,41	4,61 ±0,03
25 лет	Лиственный древостой	4,42 ±0,07	0,30 ±0,002	8,53 ±0,11	3,80 ±0,38	5,10 ±0,40	4,12 ±0,03
	Древостой с наличием хвойных пород	3,92 ±0,09	0,27 ±0,003	8,41 ±0,09	5,65 ±0,45	4,88 ±0,36	4,60 ±0,02

Для поля со сроком залежи 5 лет наибольшим рассеиванием выборки обладает содержание фосфора в бывшем пахотном (далее – пахотный) и бывшем подпахотном (далее – подпахотный) горизонтах, а наименьшим – содержание азота. Самая большая вариация у соотношения C:N – в подпахотном горизонте, а самая маленькая – у величины pH. Наибольшим раз-

махом выборки обладает содержание подвижного фосфора в подпахотном горизонте, а наименьшим – содержание общего азота в пахотном горизонте. На данном объекте значительные отклонения от нормального распределения наблюдаются у содержания гумуса в пахотном и подпахотном горизонте и у соотношения C:N только в пахотном горизонте.

Наибольшей взаимосвязью в почвенном комплексе на участке со сроком залежи пять лет обладают содержание гумуса и соотношение C:N. Значение индекса корреляции между этими показателями составляет 0,9, связь является высокой и положительной (табл. 3). Также высокая положительная связь наблюдается между содержанием гумуса и величиной pH в пахотном горизонте и между содержанием общего азота в пахотном горизонте и содержанием подвижного калия в подпахотном. Заметная положительная связь наблюдается между содержанием гумуса и общего азота в пахотном горизонте, содержанием гумуса и подвижным калием в пахотном и подпахотном горизонтах. Содержание общего азота в пахотном горизонте имеет заметную положительную связь с содержанием подвижного калия и величиной pH в пахотном горизонте, а также заметную отрицательную связь с содержанием подвижного фосфора в пахотном и подпахотном горизонтах. Содержание общего азота в подпахотном горизонте имеет заметную положительную связь с величиной pH пахотного и подпахотного горизонтов, а также высокую отрицательную связь с соотношением C:N в подпахотном горизонте. Соотношение C:N в пахотном горизонте имеет заметную положительную связь с величиной pH пахотного и подпахотного горизонтов и заметную отрицательную с содержанием подвижного фосфора в подпахотном горизонте. Соотношение C:N в подпахотном горизонте имеет заметную отрицательную взаимосвязь с величиной pH в том же горизонте. Содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте имеет заметную отрицательную связь с содержанием подвижного калия в подпахотном горизонте, а подвижный фосфор в подпахотном имеет умеренную отрицательную связь с подвижным калием в пахотном горизонте. Подвижный калий пахотного горизонта имеет заметную положительную связь с аналогичным показателем подпахотного горизонта. Содержание подвижного калия в подпахотном горизонте имеет заметную положительную связь с величиной pH пахотного горизонта, такая же связь наблюдается и между pH двух горизонтов.

В целом на бывшем пахотном поле со сроком залежи 5 лет наблюдается зависимость содержания элементов минерального питания растений от содержания гумуса и от величины pH.

Таблица 3

**Значения индексов корреляции по Пирсону
для агрохимических показателей почв поля со сроком залежи 5 лет**

**The values of Pearson correlation indices for agrochemical indices
of soils with a fallow period of 5 years**

Показатели	Гумус пах.	Гумус п-пах.	N пах.	N п-пах.	C:N пах.	C:N п-пах.	P ₂ O ₅ пах.	P ₂ O ₅ п-пах.	K ₂ O пах.	K ₂ O п-пах.	pH _{KCl} пах.
Гумус п-пах.	–0,05	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
N пах.	0,51	0,18	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
N п-пах.	0,35	0,38	0,22	1,00	–	–	–	–	–	–	–
C:N пах.	0,90	–0,14	0,09	0,31	1,00	–	–	–	–	–	–
C:N п-пах.	–0,41	0,21	–0,04	–0,79	–0,48	1,00	–	–	–	–	–
P ₂ O ₅ пах.	0,03	–0,43	–0,62	–0,49	0,33	0,22	1,00	–	–	–	–
P ₂ O ₅ п-пах.	–0,69	0,04	–0,50	–0,16	–0,58	0,30	0,21	1,00	–	–	–
K ₂ O пах.	0,53	0,02	0,52	0,37	0,39	–0,34	–0,12	–0,59	1,00	–	–
K ₂ O п-пах.	0,39	0,58	0,83	0,37	0,05	0,05	–0,57	–0,36	0,65	1,00	–
pH _{KCl} пах.	0,83	0,15	0,63	0,53	0,64	–0,37	–0,29	–0,41	0,43	0,58	1,00
pH _{KCl} п-пах.	0,56	0,16	0,13	0,65	0,57	–0,55	0,04	0,03	0,06	0,10	0,57

Примечание. Здесь и далее: п-пах. – бывший подпахотный горизонт, пах. – бывший пахотный горизонт. Жирным шрифтом выделены показатели, связь между которыми статистически достоверна по результатам проведенного дисперсионного анализа ($F_{расч} > F_{табл}$)

Рассматривая показатели залежи 10 лет, стоит отметить, что наибольшее рассеивание выборки, в отличие от поля со сроком залежи 5 лет, наблюдается у содержания подвижного калия в подпахотном горизонте, а наименьшее – также у содержания общего азота в пахотном горизонте. Наибольшая вариация, в отличие от 5-летнего залежного поля, наблюдается у содержания подвижного калия в подпахотном горизонте, а наименьшая – у количества подвижного фосфора в пахотном. В целом следует отметить более высокие показатели коэффициента вариации для

агрохимических характеристик почв на данном объекте по сравнению с бывшим пахотным полем со сроком залежи 5 лет. Максимальный размах выборки также отличается от предыдущего объекта: наибольший наблюдается у подвижного калия в подпахотном горизонте, а наименьший – также у содержания общего азота в пахотном горизонте. Распределение в выборке всех агрохимических показателей близко к нормальному. Отличие рассматриваемых статистических показателей на данном участке от участка со сроком залежи 5 лет также может свидетельствовать о влиянии сукцессионных изменений на процессы, происходящие в почвенном комплексе.

Наибольшая корреляционная связь на бывшем пахотном поле со сроком залежи 10 лет наблюдается у содержания общего азота и соотношения C:N в подпахотном горизонте (коэффициент корреляции 0,99) (табл. 4). У содержания гумуса в пахотном горизонте наблюдается заметная положительная связь с величиной pH пахотного горизонта. Содержание гумуса в подпахотном горизонте показывает заметную положительную связь с соотношением C:N в подпахотном горизонте и высокую положительную с содержанием подвижного фосфора в пахотном. У содержания общего азота в пахотном горизонте наблюдается заметная положительная связь с содержанием подвижного калия и величиной pH подпахотного горизонта. Содержание общего азота в подпахотном горизонте в свою очередь показывает высокую положительную связь с подвижным калием в пахотном горизонте, весьма высокую отрицательную с соотношением C:N пахотного и заметную отрицательную с подвижным калием в подпахотном. Соотношение C:N пахотного горизонта имеет заметную положительную связь с содержанием подвижного калия в подпахотном горизонте, весьма высокую отрицательную связь с соотношением C:N подпахотного горизонта и высокую отрицательную с подвижным калием пахотного горизонта. Соотношение C:N подпахотного горизонта показывает высокую положительную связь с содержанием подвижного калия в пахотном горизонте и заметную отрицательную с его содержанием в подпахотном. Содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте имеет высокую положительную связь с содержанием подвижного калия и величиной pH в подпахотном горизонте и заметную положительную с фосфором в подпахотном. Подвижный фосфор в подпахотном горизонте имеет положительную связь с содержанием подвижного калия и величиной pH в подпахотном горизонте. Содержание подвижного калия в подпахотном горизонте имеет весьма высокую связь с величиной pH в том же горизонте.

Таблица 4

**Значения индексов корреляции по Пирсону
для агрохимических показателей почв поля со сроком залежи 10 лет**

**The values of Pearson correlation indices for agrochemical indices
of soils with a fallow period of 10 years**

Показатели	Гумус пах.	Гумус п-пах.	N пах.	N п-пах.	C:N пах.	C:N п-пах.	P ₂ O ₅ пах.	P ₂ O ₅ п-пах.	K ₂ O пах.	K ₂ O п-пах.	pH _{KCl} пах.
Гумус п-пах.	0,33	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
N пах.	0,16	–0,19	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
N п-пах.	–0,11	0,45	–0,35	1,00	–	–	–	–	–	–	–
C:N пах.	0,17	–0,33	0,46	–0,97	1,00	–	–	–	–	–	–
C:N п-пах.	–0,12	0,53	–0,43	0,99	–0,95	1,00	–	–	–	–	–
P ₂ O ₅ пах.	0,23	0,78	0,36	0,19	–0,06	0,20	1,00	–	–	–	–
P ₂ O ₅ п-пах.	–0,36	0,34	0,34	–0,22	0,33	–0,17	0,63	1,00	–	–	–
K ₂ O пах.	0,03	0,44	–0,04	0,86	–0,84	0,79	0,46	–0,14	1,00	–	–
K ₂ O п-пах.	0,17	0,29	0,52	–0,50	0,57	–0,50	0,71	0,72	–0,13	1,00	–
pH _{KCl} пах.	0,52	0,02	–0,16	–0,09	0,07	–0,07	–0,19	–0,23	–0,20	–0,15	1,00
pH _{KCl} п-пах.	–0,01	0,40	0,55	–0,21	0,30	–0,22	0,84	0,83	0,13	0,92	–0,21

Примечание: сокращения те же, что и в табл. 3. Жирным шрифтом выделены показатели, связь между которыми статистически достоверна по результатам проведенного дисперсионного анализа ($F_{расч} > F_{табл}$)

В целом на бывшем пахотном поле со сроком залежи 10 лет наблюдается отрицательная зависимость содержания подвижного калия от общего азота и положительная – от количества органического вещества в бывшем пахотном горизонте и от величины рН. Наибольшее и наименьшее рассеивания выборки наблюдаются у тех же агрохимических показателей, что и у поля со сроком залежи пять лет – у содержания подвижного фосфора в пахотном и подпахотном горизонтах и общего азота в пахотном. Максимальное и минимальное значения коэффициентов вариации также совпадают с участком 5-летней залежи. Наибольшее значение у соотношения C:N в подпахотном горизонте, а наименьшее – у величины рН в том же горизонте. Наибольшее и наименьшее значение размаха выборки у основных агрохимических показателей также совпадает с первым рассматриваемым

участком: наибольшее наблюдается у содержания подвижного фосфора в подпахотном горизонте, а наименьшее – у количества общего азота в пахотном. Значительное отклонение от нормального распределения выборки наблюдается у соотношения C:N в пахотном и подпахотном горизонтах, содержания подвижного фосфора и величины pH в тех же горизонтах.

Значительное отличие основных показателей описательной статистики агрохимических характеристик почв участка залежью 10 лет от участков с залежью 5 и 25 лет свидетельствует о довольно существенных различиях в почвенных комплексах между данными участками. Данные отличия могут быть вызваны сукцессионными изменениями. Наибольшая корреляционная связь на бывшем пахотном поле со сроком залежи 25 лет наблюдается у содержания общего азота и соотношения C:N в подпахотном горизонте (значение индекса корреляции 0,94) с весьма сильной положительной связью (табл. 5). Содержание гумуса в пахотном горизонте имеет заметную положительную связь с таким же показателем в подпахотном горизонте и заметную отрицательную связь с величиной pH в пахотном и подпахотном горизонтах. Содержание общего азота в подпахотном горизонте показывает высокую отрицательную связь с соотношением C:N в пахотном горизонте. Также наблюдается высокая отрицательная связь между соотношением C:N в пахотном и подпахотном горизонтах. Содержание подвижного фосфора в пахотном горизонте имеет заметную положительную связь с содержанием фосфора в подпахотном горизонте и величиной pH в пахотном и подпахотном горизонтах. Величина pH в пахотном горизонте имеет высокую положительную связь с такой же величиной в подпахотном горизонте.

Стоит отметить, что с увеличением срока залежи бывших пахотных земель наблюдается снижение количества значимых корреляционных связей между агрохимическими показателями почвы. Данная тенденция также может быть связана с временными изменениями в почвенном комплексе, которые происходят в результате прекращения сельскохозяйственного пользования и восстановления естественной растительности.

Необходимо отметить, что с уменьшением количества корреляционных связей среди агрохимических показателей почв с увеличением срока залежи наблюдается увеличение доли статистически достоверных взаимодействий. Данная тенденция также подтверждает наличие сукцессионных изменений в почвенном комплексе и указывает на постепенную стабилизацию протекающих в нем процессов, нарушенных с изменением такого фактора почвообразования, как растительность, и прекращением регулярного антропогенного воздействия (вспашки).

Таблица 5

**Значения индексов корреляции по Пирсону
для агрохимических показателей почв поля со сроком залежи 25 лет**

**The values of Pearson correlation indices for agrochemical indices
of soils with a fallow period of 25 years**

Показатели	Гумус пах.	Гумус п-пах.	N пах.	N п-пах.	C:N пах.	C:N п-пах.	P ₂ O ₅ пах.	P ₂ O ₅ п-пах.	K ₂ O пах.	K ₂ O п-пах.	pH _{KCl} пах.
Гумус п-пах.	0,54	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–	–
N пах.	–0,18	–0,37	1,00	–	–	–	–	–	–	–	–
N п-пах.	0,32	0,29	–0,07	1,00	–	–	–	–	–	–	–
C:N пах.	–0,24	–0,29	0,29	–0,88	1,00	–	–	–	–	–	–
C:N п-пах.	0,35	0,38	–0,25	0,94	–0,76	1,00	–	–	–	–	–
P ₂ O ₅ пах.	–0,24	0,005	0,06	–0,05	–0,08	–0,11	1,00	–	–	–	–
P ₂ O ₅ п-пах.	–0,04	–0,07	0,08	0,12	–0,13	0,12	0,54	1,00	–	–	–
K ₂ O пах.	0,21	0,18	–0,13	–0,03	–0,02	0,002	0,08	–0,01	1,00	–	–
K ₂ O п-пах.	0,07	0,37	–0,12	0,20	–0,31	0,16	0,17	–0,07	0,21	1,00	–
pH _{KCl} пах.	–0,53	–0,28	0,19	–0,27	0,18	–0,32	0,60	0,12	–0,03	0,21	1,00
pH _{KCl} п-пах.	–0,54	–0,39	0,20	–0,27	0,16	–0,34	0,60	0,32	0,002	–0,05	0,80

Примечание: сокращения те же, что и в табл. 3. Жирным шрифтом выделены показатели, связь между которыми статистически достоверна по результатам проведенного дисперсионного анализа ($F_{расч} > F_{табл}$)

В результате восстановительной сукцессии естественной лесной растительности на бывших сельскохозяйственных территориях в их почвенном комплексе происходят значительные изменения. Наиболее сильные изменения, происходящие в почве на участках разной залежи, видны на примере взаимосвязи величины pH и содержания гумуса. Так, на бывшем пахотном поле залежью 5 лет наблюдается тенденция к увеличению содержания гумуса со снижением кислотности (рис. 1). На данном возрастном этапе восстановительной сукцессии на участках с более низкой кислотностью происходит более активный процесс накопления органического вещества.

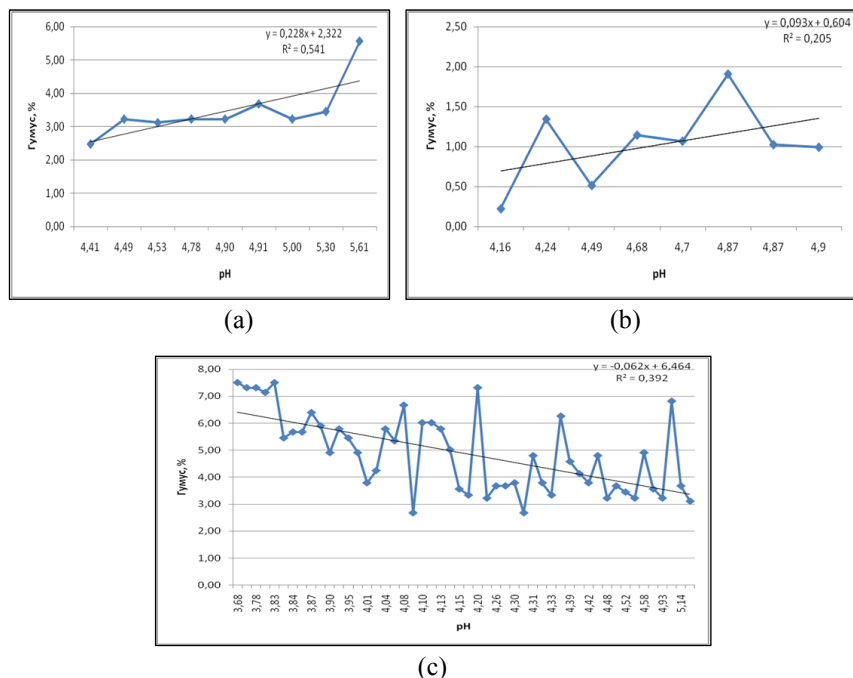


Рис. 1. Взаимосвязь величины pH и содержания гумуса на участках разных сроках залежности: (а) залежь 5 лет; (б) залежь 10 лет; (с) залежь 25 лет

Fig. 1. Relationship between pH value and humus content at sites of different fallow periods: (a) fallow 5 years; (b) fallow 10 years; (c) fallow 25 years

На участке со сроком залежи 10 лет уже не будет такой устойчивой тенденции к увеличению содержания гумуса с увеличением показателя pH (рис. 1б). На сроке залежи 10 лет растительный покров постагрогенных территорий становится более неоднородным и появляется густое лиственное возобновление, что в свою очередь оказывает влияние на почвенный комплекс и также увеличивает его неоднородность.

На поле сроком залежи 25 лет уже будет наблюдаться обратная зависимость. Так, на данном возрастном этапе восстановительной сукцессии будет наблюдаться увеличение содержания в почве гумуса с увеличением кислотности почвенной среды. Наиболее активная минерализация органического вещества почвы будет происходить на участках с более высокими значениями величины pH, так как кислая реакция почвенной среды пре-

пятствует жизнедеятельности почвенных микроорганизмов, которые способствуют процессу разложения органики.

Данная закономерность изменения во взаимосвязи содержания гумуса с величиной pH, возможно, связана с изменениями в процессе поступления и накопления органического вещества в почве. Активно развивающаяся древесная растительность поглощает большое количество питательных элементов и затрудняет развитие живого напочвенного покрова, образуя мертвопокровные участки в местах с густым листовым возобновлением. Вместе с этим в почву начинает поступать значительно меньшее количество органических веществ из быстроразлагающихся травянистых растений, а древесный опад имеет более низкую скорость разложения и накапливается под пологом в виде лесной подстилки. Таким образом, в ходе восстановительной сукцессии на бывших сельскохозяйственных землях помимо смены растительных сообществ происходят смены почвенных режимов и, как следствие, изменения в интенсивности и направленности почвообразующих процессов.

Вышеприведенный вывод подтверждают и результаты корреляционного анализа. Значение индекса корреляции Пирсона между содержанием гумуса в почве и величиной pH для поля сроком залежи 5 лет свидетельствует о наличии высокой положительной связи и составляет 0,83. Для поля залежью 10 лет данный коэффициент уже составляет 0,52, что свидетельствует об ослаблении связи между двумя этими показателями, но она остается заметной и положительной. На участке со сроком залежи 25 лет взаимосвязь между содержанием гумуса в почве и величиной pH меняется на заметную отрицательную; значение коэффициента Пирсона будет составлять -0,53.

Помимо изменений в процессе накопления органического вещества почвы в ходе восстановительной сукцессии на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, происходят изменения и в активности почвенных микроорганизмов. В табл. 6 приведены результаты исследования биологической активности постагрогенных почв на объектах исследования. Заметно, что на изучаемых участках нет четкой закономерности между почвенным плодородием и биологической активностью почвы. Однако стоит отметить, что биологическая активность почвы с увеличением срока залежи в целом увеличивается, но изменяются доминирующие показатели. Скорость эмиссии углекислого газа на всех опытных участках практически одинаковая, что свидетельствует о равной скорости минерализации органического вещества почвы на всех изучаемых сроках залежи, однако наименьшее значение этого показателя наблюдается на пахотном участке (бывшая залежь 5 лет), а наибольшее – на

участке с залежью 10 лет. Также стоит отметить, что данный показатель не имеет закономерного изменения с изменением соотношения C:N, хотя оба этих показателя характеризуют скорость минерализации органического вещества почвы. Активность микроорганизмов определялась по скорости разложения льняного полотна в почве. На данный показатель большое влияние оказывают почвенные микромицеты и представители почвенной фауны, и именно с этим связано расхождение в показателях для участка со сроком залежи 25 лет с густым листовым возобновлением, где льняное полотно со сроком экспозиции 2 месяца имеет потерю по массе меньше, чем со сроком экспозиции 1 месяц. Это происходит из-за неоднородности почвенных условий на данном участке, так как на наиболее сильно разложившихся образцах льняного полотна наблюдалось большое количество грибного мицелия, повреждения насекомыми или дождевые черви. В целом активность почвенных микромицетов и фауны уменьшается с увеличением срока залежи, однако на участке со сроком залежи 25 лет с густым листовым возобновлением наблюдается самое большое значение данного показателя при сроке экспозиции один месяц. Общее микробное число (ОМЧ) характеризует активность почвенных бактерий. Данный показатель демонстрирует противоположные результаты. Он возрастает с увеличением срока залежи и имеет самое низкое значение на участке залежью 25 лет с густым листовым возобновлением. Данная особенность может быть связана с тем, что на этом участке преобладает возобновление древовидной и кустовой ивы. Ивовый опад имеет кислую реакцию среды и, следовательно, медленно разлагается; такие условия наиболее подходящие для развития почвенных микромицетов.

Таблица 6

Показатели биологической активности почв на объектах исследования

Indicators of biological activity of soils at the study sites

Возраст залежи		pH _{KCl}	C:N	Эмиссия CO ₂ , мг CO ₂ /кг*ч	Акт. микр. за 1 мес., %	Акт. микр. за 2 мес., %	ОМЧ, КОЕ
Пашня (залежь 5 лет)		4,83	5,56	0,81	14,63	49,17	180
10 лет		4,61	1,42	1,32	10,16	28,99	690
25 лет	Листв. др.	4,12	8,53	1,14	27,04	22,67	290
	Хв. др.	4,60	8,41	1,21	6,14	19,80	1730

Примечание: Листв. др. – листовый древостой; Хв. др. – древостой с наличием хвойных пород; Акт. микр. – активность микроорганизмов.

На исследуемых участках бывших пахотных земель с различным сроком залежи наблюдается различие в составе почвенных микромицетов. Так, на пахотном поле (бывшее поле со сроком залежи 5 лет) встречаются 3 рода микромицетов: *Rhizopus*, *Cladosporium* и *Penicillium*. На бывшем пахотном поле со сроком залежи 10 лет встречаются почвенные микромицеты 4 родов: *Rhizopus*, *Cladosporium*, *Penicillium* и *Botrytis*. На участке бывшей пашни со сроком залежи 25 лет, пройденном пожаром, с наличием хвойного возобновления встречаются представители 2 родов микромицетов: *Rhizopus* и *Mucor*. На участке с залежью 25 лет с густым листовым возобновлением встречаются представители 3 родов почвенных микромицетов: *Rhizopus*, *Penicillium* и *Trichoderma*. Все обнаруженные роды почвенных микромицетов являются распространенными сапрофитами и активно участвуют в процессе разложения растительного опада (разрушают клетчатку) и гумификации органических остатков [Омелянский, 2023]. Из представленных данных нельзя достоверно сделать вывод о коренных изменениях в составе почвенных микромицетов в ходе восстановительной сукцессии. Однако можно предположить, что пирогенное воздействие отрицательно сказывается на почвенном грибном сообществе, так как на участке, пройденном пожаром, встречаются только 2 рода. Также следует отметить, что на всех остальных участках встречаются представители родов *Rhizopus* и *Penicillium*, но остальные роды отличаются, однако нельзя утверждать, что эти различия в составе почвенных микромицетов являются результатом изменений, происходящих в ходе восстановительной сукцессии, а не каких-либо других факторов.

Заключение. Проведенное исследование показало различия в почвенном комплексе в процессе восстановительной сукцессии на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования:

- исследуемые почвы вне зависимости от срока залежности характеризуются кислой реакцией среды (средне- и сильнокислая);
- с увеличением срока залежи на исследуемых участках наблюдается уменьшение содержания подвижного фосфора (на участках со сроком залежи 5 и 10 лет высокое содержание, а на участках 25 лет – низкое);
- с увеличением срока залежи наблюдается уменьшение числа корреляционных связей между агрохимическими показателями почв, но увеличивается доля статистически достоверных связей, что указывает на стабилизацию естественных процессов, протекающих в почвенном комплексе, которые были нарушены регулярной вспашкой;

- в процессе восстановительной сукцессии на постагрогенных территориях происходят изменения в процессе гумусонакопления: направление процесса меняется от увеличения гумуса с увеличением величины рН на участке с залежью 5 лет к уменьшению гумуса с увеличением величины рН на участке с залежью 25 лет;

- с увеличением срока залежи уменьшается активность почвенных микромицетов и увеличивается влияние почвенных бактерий.

Процессы, протекающие в почвенном комплексе на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, требуют дальнейшего пристального изучения для разработки рекомендаций по их использованию.

Вклад авторов. Все авторы внесли равный вклад на всех этапах исследования.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Агрохимия / под ред. В.Г. Минеева. М.: Изд-во ВНИИА им. Д.Н. Прянишникова, 2017. 854 с.

Апарин Б.Ф. Географические основы рационального использования почв (на двучленных породах). СПб: Наука, 1992. 190 с.

Апарин Б.Ф. Почвоведение: учеб. для образоват. учреждений сред. проф. образования. М.: Изд. центр «Академия», 2012. 256 с.

Бурдуковский М.Л., Перепелкина П.А. Агроэкологическое состояние почв и восстановление растительности в залежных экосистемах // Биота и среда природных территорий. 2022. Т. 10. № 2. С. 28–36. DOI: 10.37102/2782-1978_2022_2_3

Государственный (национальный) доклад о состоянии и использовании земель в Российской Федерации в 2019 году. М.: Росреестр, 2020. 206 с.

Данилов Д.А., Шестаков В.А., Шестакова Т.А., Эндерс О.О. Сукцессионные стадии восстановления древесной растительности на постагрогенных землях Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2020. Вып. 233. С. 60–80.

Данилов Д., Яковлев А., Суворов С., Крылов И., Корчагов С., Хамитов Р. Формирование надземной фитомассы лиственных древесных пород на постагрогенных землях // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. Вып. 1. С. 65–76. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-65-76

Доклад о состоянии и использовании земель в Ленинградской области в 2020 г. Управление Федеральной службы государственной регистрации, кадастра и картографии по Ленинградской области. 150 с.

Захарченко А., Пасько О., Сорокин И. Динамика сокращения площадей пахотных земель по данным их долгосрочного мониторинга в Томской области // Экология и промышленность России. 2021. Вып. 25 (7). С. 54–59. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-7-54-59

Карпин В.А., Петров Н.В., Туюнен А.В. Восстановление лесных фитоценозов после различных видов сельскохозяйственного использования земель в условиях среднетаежной подзоны // Сибирский лесной журнал. 2017. № 6. С. 120–129. DOI: 10.15372/SJFS20170610

Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 343 с.

Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 225 с.

Курганова И.Н., Лопес де Гереню В.О., Мостовая А.С., Овсепян Л.А., Телеснина В.М., Личко В.И., Баева Ю.И. Влияние процессов естественного лесовосстановления на микробиологическую активность постагрогенных почв европейской части России // Лесоведение. 2018. № 1. С. 3–23.

Литвинович А.В., Павлова О.Ю., Лаврищев А.В., Буре В.М. Изучение показателей почвенного плодородия окультуренной дерново-подзолистой песчаной почвы на разных стадиях формирования природных экосистем // Агрохимия. 2022. № 6. С. 14–27. DOI: 10.31857/S0002188122060084

Люри Д.И., Горячкин С.В., Караваева Н.А., Денисенко Е.А., Нефедова Т.Г. Динамика сельскохозяйственных земель России в XX веке и постагрогенное восстановление растительности и почв. М., 2010. 416 с.

Мишустин Е.Н., Петрова А.Н. Определение биологической активности почвы // Микробиология. 1963. № 3. Т. 32. С. 479–483.

Омелянский В.Л. Краткий курс общей и почвенной микробиологии. М.: Юрайт, 2023. 173 с.

Пестряков В.К. Почвы Ленинградской области. Л.: Лениздат, 1973. 342 с.

Тюрин И.В. Почвообразовательный процесс, плодородие почв и проблема азота в почвоведении и земледелии // Почвоведение. 1956. №3. С. 1–17.

Чертov О.Г. Экология лесных земель: почвенно-экологическое исследование лесных местообитаний. Л.: Наука, 1981. 169 с.

Шафран С.А., Ермаков А.А., Виноградова С.Б., Семенова А.И. Изменение плодородия почв Нечерноземной зоны за 50-летний период // Агрохимический вестник. 2021. № 5. С. 3–7. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-001

Anpilogova D., Pakina A. Assessing ecosystem services of abandoned agricultural lands: a case study in the forested zone of European Russia // One Ecosystem. 2022. Vol. 7. Art. e77969.

Danilov D.A., Shestakova T.A., Shestakova V.I., Anders O.O., Ivanov A.A. The Effect of Living Ground Cover on the Development of the Young Generation of Tree Species on Post-Agrogenic Lands of the Boreal Zone // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2020. No. 574. Art. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012015

Gunina A., Ryzhova I., Dorodnikov M., Kuzyakov Y. Effect of plant communities on aggregate composition and organic matter stabilisation in young soils // Plant Soil. 2015. Vol. 387. P. 265–275.

Kalinina O., Cherkinsky A., Chertov O., Goryachkin S., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Lyuri D., Kuzyakov Ya., Giani L. Post-agricultural restoration: Implica-

tions for dynamics of soil organic matter pools // *Catena*. 2019. Vol. 181. Art. 104096. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104096

Kukuļs I., Kļaviņš M., Nikodemus O., Kasparinskis R., Brūmelis G. Changes in Soil Organic Matter and Soil Humic Substances Following the Afforestation of Former Agricultural Lands in the Boreal-Nemoral Ecotone (Latvia) // *Geoderma Regional*. 2019. Vol. 16, art. e00213. DOI: 10.1016/j.geodrs.2019.e00213

Lopes de Gerenyu V., Mostovaya A., Ovsepyan L., Telesnina V., Lichko V., Baeva Y.I., Kyrganova I.N. Effect of Reforestation on Microbiological Activity of Postagrogenic Soils in European Russia // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. Vol. 11. P. 704–718.

Ovsepyan L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Recovery of Organic Matter and Microbial Biomass After Abandonment of Degraded Agricultural Soils: The Influence of Climate // *Land Degradation & Development*. 2019. Vol. 30, iss. 15. P. 1861–1874. DOI: 10.1002/ldr.3387

Segura C., Navarro F.B., Jiménez M.N., Fernández-Ondoño E. Implications of Afforestation vs. Secondary Succession for Soil Properties Under a Semiarid Climate // *Science of the Total Environment*. 2020. Vol. 704. Art. 135393. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135393

Spohn M., Tibor N., Incze J., Giani L. Dynamics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in calcareous soils after land-use abandonment – A chronosequence study // *Plant Soil*. 2015. Vol. 401. P. 185–196.

Susyan E., Wirth S., Ananyeva N., Stolnikova E. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity // *The European Journal of Soil Biology*. 2011. Vol. 47. P. 169–174.

References

Agrochemistry / ed. by V. G. Mineev. M.: Pryanishnikov Institute of Agrochemistry Publishing House, 2017. 854 p. (In Russ.)

Anpilogova D., Pakina A. Assessing ecosystem services of abandoned agricultural lands: a case study in the forested zone of European Russia. *One Ecosystem*, 2022, vol. 7, art. e77969.

Aparin B.F. Geographic bases of soil management (on bipartite rocks). St. Petersburg: Nauka, 1992. 190 p. (In Russ.)

Aparin B.F. Soil Science: textbook for educational institutions of secondary vocational education. M.: Publishing Center «Academy», 2012. 256 p. (In Russ.)

Burdukovskij M.L., Perepelkina P.A. Agroecological condition of soils and vegetation restoration in fallow ecosystems. *Biodiversity and environment of protected areas*, 2022, no. 10(2), pp. 28–36. DOI: 10.37102/2782-1978_2022_2_3 (In Russ.)

Chertov O.G. Ecology of forest lands: soil-ecological study of forest habitats. L.: Nauka, 1981. 169 p. (In Russ.)

Classification and diagnostics of soils of Russia. Smolensk: Oikumena, 2004. 343 p. (In Russ.)

Classification and diagnostics of soils of the USSR. M.: Kolos, 1977. 225 p. (In Russ.)

Danilov D.A., Shestakov V.I., Shestakova T.A., Enders O.O. Successional Stages of Restoration of Woody Vegetation on Postagrogenic Lands of the Leningrad Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2020, iss. 233, pp. 60–80. DOI: 10.21266/2079-4304.2020.233.60-80. (In Russ.)

Danilov D.A., Shestakova T.A., Shestakova V.I., Anders O.O., Ivanov A.A. The Effect of Living Ground Cover on the Development of the Young Generation of Tree Species on Post-Agrogenic Lands of the Boreal Zone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2020, no. 574, art. 012015. DOI: 10.1088/1755-1315/574/1/012015

Danilov D., Yakovlev A., Suvorov C., Krylov I., Korchagov C., Khamitov P. Formation of Aboveground Phytomass of Deciduous Tree Species on Post-Agrogenic Lands. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal*, 2023, no. 1, pp. 65–76. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-1-65-76. (In Russ.)

Gunina A., Ryzhova I., Dorodnikov M., Kuzyakov Y. Effect of plant communities on aggregate composition and organic matter stabilisation in young soils. *Plant Soil*, 2015, vol. 387, pp. 265–275.

Kalinina O., Cherkinsky A., Chertov O., Goryachkin S., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Lyuri D., Kuzyakov Ya., Giani L. Post-agricultural restoration: Implications for dynamics of soil organic matter pools. *Catena*, 2019, vol. 181, art. 104096. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104096

Karpin V.A., Petrov N.V., Tuyunen A.V. Regeneration of Forest Phytocoenoses After Various Agricultural Land Use Practices in the Conditions of Middle Taiga Subzone. *Siberian Journal of Forest Science*, 2017, no. 6, pp. 120–129. DOI: 10.15372/SJFS20170610. (In Russ.)

Kukuļs I., Kļaviņš M., Nikodemus O., Kasparinskis R., Brūmelis G. Changes in Soil Organic Matter and Soil Humic Substances Following the Afforestation of Former Agricultural Lands in the Boreal-Nemoral Ecotone (Latvia). *Geoderma Regional*, 2019, vol. 16, art. e00213. DOI: 10.1016/j.geodrs.2019.e00213

Kurganova I.N., Lopes de Gerenyu V.O., Mostovaya A.S., Ovsepyan L.A., Telesnina V.M., Lichko V.I., Baeva Yu.I. Influence of natural reforestation processes on microbiological activity of post-agrogenic soils of the European part of Russia. *Russian Journal of Forest Science*, 2018, no. 1, pp. 3–23. (In Russ.)

Litvinovich A.V., Pavlova O.Yu., Lavrishchev A.V., Bure V.M. Study of soil fertility indicators of cultivated sod-podzolic sandy soil at different stages of formation of natural ecosystems. *Agrochemistry*, 2022, no. 6, pp. 14–27. DOI: 10.31857/S0002188122060084. (In Russ.)

Lopes de Gerenyu V., Mostovaya A., Ovsepyan L., Telesnina V., Lichko V., Baeva Yu.I., Kurganova I.N. Effect of Reforestation on Microbiological Activity of Postagrogenic Soils in European Russia. *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, vol. 11, pp. 704–718.

Lyuri D.I., Goryachkin S.V., Karavaeva N.A., Denisenko E.A., Nefedova T.G. Dynamics of Russian agricultural land in the twentieth century and post-agro-genic restoration of vegetation and soils. M., 2010. 416 p. (In Russ.)

Mishustin E.N., Petrova A.N. Determination of biological activity of soil. *Microbiology*, 1963, no. 3, vol. 32, pp. 479–483. (In Russ.)

Omelyansky V.L. Short course of general and soil microbiology. M.: Yurait, 2023. 173 p. (In Russ.)

Ovsepyan L., Kurganova I., Lopes de Gerenyu V., Kuzyakov Y. Recovery of Organic Matter and Microbial Biomass After Abandonment of Degraded Agricultural Soils: The Influence of Climate. *Land Degradation & Development*, 2019, vol. 30, iss. 15, pp. 1861–1874. DOI: 10.1002/ldr.3387

Pestryakov V.K. Soils of the Leningrad Region. L.: Lenizdat, 1973. 342 p. (In Russ.)

Report on the state and use of land in the Leningrad Region in 2020. Department of the Federal Service for State Registration, Cadastre and Cartography in the Leningrad Region. 150 p. (In Russ.)

Segura C., Navarro F.B., Jiménez M.N., Fernández-Ondoño E. Implications of Afforestation vs. Secondary Succession for Soil Properties Under a Semiarid Climate. *Science of the Total Environment*, 2020, vol. 704, art. 135393. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135393

Shafran S.A., Ermakov A.A., Vinogradova S.B., Semenova A.I. Changes in soil fertility in the Non-Chernozem zone over a 50-year period. *Agrochemical Herald*, 2021, no. 5, pp. 3–7. DOI: 10.24412/1029-2551-2021-5-001. (In Russ.)

Spohn M., Tibor N., Incze J., Giani L. Dynamics of soil carbon, nitrogen, and phosphorus in calcareous soils after land-use abandonment – A chronosequence study. *Plant Soil*, 2015, vol. 401, pp. 185–196.

State (national) report on the state and use of land in the Russian Federation in 2019. M.: Rosreestr, 2020. 206 p. (In Russ.)

Susyan E., Wirth S., Ananyeva N., Stolnikova E. Forest succession on abandoned arable soils in European Russia – Impacts on microbial biomass, fungal-bacterial ratio, and basal CO₂ respiration activity. *The European Journal of Soil Biology*, 2011, vol. 47, pp. 169–174.

Tyurin I.V. Soil formation process, soil fertility and the problem of nitrogen in soil science and agriculture. *Soil Science*, 1956, no. 3, pp. 1–17. (In Russ.)

Zaharchenko A., Pas'ko O., Sorokin I. Dynamics of reduction of arable land areas according to their long-term monitoring in Tomsk Oblast. *Ecology and Industry of Russia*, 2021, no. 25(7), pp. 54–59. DOI: 10.18412/1816-0395-2021-7-54-59. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 22.01.2024

Данилов Д.А., Яковлев А.А., Зайцев Д.А., Иванов А.А. Изменения в постагрогенных почвах в ходе восстановления древесной растительности в условиях юго-запада Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 97–122. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.97-122

Вследствие процесса восстановления естественного растительного покрова на постагрогенных территориях происходят изменения в экологических функциях почвы и в почвообразовательном процессе, которые в свою очередь ведут к эволюционным изменениям во всем почвенном комплексе. В работе рассмотрена связь ранних стадий возобновления древесно-кустарниковой растительности на залежных землях и агрохимическое состояние почвенного комплекса под ними. Объекты объединены сходными почвенно-грунтовыми условиями, расположены в Ленинградской области, Россия. Серия опытов имела сроки прекращения использования под пашню в 5, 10 и 25 лет. Была проведена таксация растительности и отбор почвенных образцов с последующим проведением агрохимических анализов. На опытных участках также были заложены опыты по выявлению микробиологической активности и почвенному дыханию. Результаты исследования показали, что на опытных объектах почвы вне зависимости от срока залежности характеризуются кислой реакцией среды (средне- и сильноокислая). С увеличением срока залежи на исследуемых участках наблюдается уменьшение содержания подвижного фосфора (на участках со сроком залежи 5 и 10 лет высокое содержание, а на участках 25 лет – низкое). С увеличением срока залежи наблюдается уменьшение числа корреляционных связей между агрохимическими показателями почв, но увеличивается доля статистически достоверных связей, что указывает на стабилизацию естественных процессов, протекающих в почвенном комплексе, которые были нарушены регулярной вспашкой. В процессе восстановительной сукцессии на постагрогенных территориях происходят изменения в процессе гумусоаккумуляции: направление процесса меняется от увеличения гумуса с увеличением величины pH на участке с залежью 5 лет, к уменьшению гумуса с увеличением величины pH на участке с залежью 25 лет. С увеличением срока залежи уменьшается активность почвенных микромицетов и увеличивается влияние почвенных бактерий. Процессы, протекающие в почвенном комплексе на землях, вышедших из активного сельскохозяйственного пользования, требуют дальнейшего пристального изучения для разработки рекомендаций по их использованию.

Ключевые слова: залежные земли, агрохимические показатели, сукцессионные стадии, содержание гумуса, микробиологическая активность.

Danilov D.A., Yakovlev A.A., Zaitsev D.A., Ivanov A.A. Changes in post-agricultural soils during the restoration of woody vegetation in the conditions of the south-west of the Leningrad Region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 97–122 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.97-122

Due to the process of restoration of natural vegetation cover on post-agrogenic territories, changes occur in the ecological functions of soil and in the soil formation process, which in turn lead to evolutionary changes in the entire soil complex. The paper considers the relationship between the early stages of tree and shrub vegetation

regeneration on fallow lands and the agrochemical state of the soil complex under them. The objects are united by similar soil and ground conditions, located in Leningrad region, Russia. The series of experiments had time periods of stopping use under arable land at 5, 10 and 25 years. Vegetation taxation was carried out and soil samples were collected with following agrochemical analyses. Experimental plots were also plotted to detect microbiological activity and soil respiration. The results of the study showed that on the experimental sites soils regardless of the fallow period are characterized by acidic reaction of the environment (medium and strongly acidic). With the increase of fallow period on the studied plots there is a decrease in the content of mobile phosphorus (on plots with fallow period of 5 and 10 years the content is high, and on plots with fallow period of 25 years it is low). With the increase of fallow period there is a decrease in the number of correlations between agrochemical soil indicators, but the share of statistically reliable relationships increases, indicating stabilization of natural processes occurring in the soil complex, which were disturbed by regular plowing. In the process of restoration succession on post-agrogenic territories changes in the process of humus accumulation occur – the direction of the process changes from increase of humus with increase of pH value on the plot with fallow land of 5 years, to decrease of humus with increase of pH value on the plot with fallow land of 25 years. The activity of soil micro-mycetes decreases with increasing fallow period and the influence of soil bacteria increases. The processes occurring in the soil complex on lands withdrawn from active agricultural use require additional close study in order to develop further recommendations for their management.

Keywords: fallow lands, agrochemical indicators, succession stages, humus content, microbiological activity.

ДАНИЛОВ Дмитрий Александрович – заведующий кафедрой почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук; главный научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля им. А.Г. Лорха». SPIN-код: 5826-3852. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия; 188338, Институтская ул., д. 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия. E-mail: stown200@mail.ru

DANILOV Dmitry A. – DSc (Agriculture), Head of Soil Science Department of St.Petersburg State Forest Technical University; head researcher of Department of Agrochemistry and Agrolandscapes, Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre. SPIN-code: 5826-3852. ORCID: 0000-0002-7504-5743.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia; 188338. Institutskaya str. 1. Belogorka. Leningrad Region. Russia. E-mail: stown200@mail.ru

ЯКОВЛЕВ Артём Антонович – ассистент кафедры почвоведения Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID:0000-0001-8450-2806.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: artem95692@gmail.com

YAKOVLEV Artem A. – Assistant of Soil Department at St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0001-8450-2806.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: artem95692@gmail.com

ЗАЙЦЕВ Дмитрий Андреевич – старший научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха», кандидат сельскохозяйственных наук. SPIN-код: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

188338, Институтская ул., д. 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия. E-mail: disoks@gmail.com

ZAYTSEV Dmitriy A. – PhD (Agriculture), Senior Researcher of Department of Agrochemistry and Agrolandscapes, Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre. SPIN-code: 1340-0849. ORCID: 0000-0002-8704-6516.

188338. Institutskaya str. 1. Belogorka. Leningrad Region. Russia. E-mail: disoks@gmail.com

ИВАНОВ Алексей Алексеевич – научный сотрудник отдела агрохимии и агроландшафтов Ленинградского НИИСХ «Белогорка» – филиала ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр картофеля имени А.Г. Лорха». SPIN-код: 3722-0709. ORCID: 0000-0002-0379-9191.

188338, Институтская ул., д. 1, д. Белогорка, Гатчинский район, Ленинградская область, Россия. E-mail: iwanov.le2011@yandex.ru

IVANOV Aleksey A. – Researcher of Department of Agrochemistry and Agrolandscapes, Leningrad Research Agriculture Institute Branch of Russian Potato Research Centre. SPIN-code: 3722-0709. ORCID: 0000-0002-0379-9191.

188338. Institutskaya str. 1. Belogorka. Leningrad Region. Russia. E-mail: iwanov.le2011@yandex.ru

А.А. Чалкин, О.А. Кулинич, Н.И. Козырева, Е.Н. Арбузова

**К ИЗУЧЕНИЮ РОЛИ ВЕРШИННОГО КОРОЕДА *IPS ACUMINATUS*
В ТРАНСМИССИИ ФИТОПАТОГЕННЫХ НЕМАТОД
РОДА *BURSAPHELENCHUS***

Введение. Заболевание «вилт хвойных пород» относится к числу опасных болезней сосновых лесов. Возбудитель заболевания – сосновая стволовая нематода *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner et Buhrer, 1934; Nickle, 1970) – внесена в перечни карантинных организмов многих стран мира [Webster, Mota, 2008]. Этот патоген был завезен из Северной Америки в Азию (Япония, Китай, Республика Корея) [Yang, Wang, 1989; Togashi, Jikumaru, 2007], а затем в Европу (Португалия, включая остров Мадейра, Испания) в конце 1990-х годов [Mota et al., 1999; Fonseca et al., 2012; Vicente et al., 2012] и продолжает интенсивно расширять свой инвазивный ареал [Inácio et al., 2015; EPPO, 2023].

Перенос нематод с дерева на дерево осуществляется ксилофильными жесткокрылыми усачами рода *Monochamus* (Megerle) (Coleoptera, Cerambycidae) [Wingfield et al., 1984; Linit, 1988; Akbulut, Stamps, 2012]. Личинки усачей питаются флоэмой, а позднее проделывают ход и окукливаются в ксилеме [Linsley, Chemsak, 1984]. Заселение жуков нематодами происходит в древесине перед выходом усачей из куколки. Химические вещества, вырабатываемые во время окукливания усачей, служат сигналом для заселения личинками (dauer) *B. xylophilus* жуков. Личинки нематод проникают через дыхательные отверстия жука и концентрируются преимущественно в трахейной системе [Necibi, Linit, 1998; Sone et al., 2011]. После выхода из куколки молодые жуки усачей проходят стадию дополнительного питания на молодых веточках здоровых сосен, и в этот период нематоды покидают жуков и проникают в ветки дерева через повреждения коры, наносимые жуками [Wingfield et al., 1984; Jikumaru, Togashi, 2003]. Также выход нематод из жуков осуществляется во время откладки яиц на ослабленные и поваленные деревья, когда самка усача делает насечки на коре. Таким образом, жизненные циклы нематод *B. xylophilus* и усачей *Monochamus* spp. синхронизированы [Linit, 1988].

Усачи рода *Monochamus* широко распространены в хвойных лесах северного полушария, и считается, что все они могут быть потенциальными переносчиками нематод *B. xylophilus*. Основными переносчиками этой нематоды в Азии являются усачи *M. alternatus* (Hope, 1842), *M. saltuarius* (Gebler, 1830), в Европе – *M. galloprovincialis* (Olivier, 1795). На территории России широко распространены усачи *Monochamus urussowii* (Fischer von Waldheim, 1806), *M. galloprovincialis*, *M. sutor* (Linnaeus, 1758), *M. saltuarius* (Gebler, 1830), *M. impluviatus* (Motschulsky, 1859), которые рассматриваются как потенциальные переносчики *B. xylophilus* [Linit, 1988; Necibi, Linit, 1998; Akbulut, Stamps, 2012].

Помимо усачей ослабленные деревья заселяются другими видами насекомых-ксилофагов, в частности, короедами родов *Ips*, *Tomicus*, *Orthotomicus* и *Pityogenes* [Knížek, 2011; Hlávková, Doležal, 2022], которые являются экологически и экономически значимыми вредителями сосновых древостоев. К числу наиболее широко распространенных видов, заселяющих ослабленные деревья, относятся короеды рода *Ips*. Обычно представители этого рода рассматриваются как вторичные вредители, заселяющие уже ослабленные древостои, однако при высокой плотности популяции они могут быть первичными вредителями. Примерами могут служить короед-типограф *Ips typographus* (Linnaeus, 1758), нанесший существенный ущерб еловым древостоям в европейской части РФ [Гниненко, Хегай 2018], и *Ips amitinus* (Eichhoff, 1871), вызвавший массовую гибель кедра сибирского в 2019 г. в Томской области на участках в сотни гектар [Керчев и др., 2018; Кулинич и др., 2022]. Среди 6 видов короедов, обитающих в РФ [Кулинич и др., 2022], а также в Европе, следует обратить внимание на вершинного короеда *Ips acuminatus* (Gyllenhal, 1827), который имеет в своем цикле стадию дополнительного питания, предпочитая заселять открытые к солнцу части деревьев (*Pinus* spp.) [Siitonen, 2014]. Иногда жуки этого вида могут заселять деревья других хвойных пород: *Abies* spp.; *Larix* spp. [Ижевский, 2005]. При средней длине тела от 2,2 до 3,9 мм [Cognato, 2015] жук делает ходы на участках с гладкой корой и тонкой флорой, а именно на верхней части ствола или ветвей. Самцы прогрызают внешнюю кору и создают новую галерею на границе флоры и заболони, строя брачную камеру. Каждая самка откладывает несколько яиц по обе стороны своего хода и покрывает их буровой мукой. Личинки и молодые жуки развиваются во флоре, питаются растительной тканью. После прохождения трех личиночных возрастов, окукливания и созревания молодые имаго вершинного короеда разлетаются для заселения других деревьев [Kirkendall, 1990].

Как вторичный вредитель, вершинный короед *I. acuminatus* заселяет деревья на ранних стадиях их угнетения [Hlávková, Doležal, 2022], что является незначительной угрозой для сосновых насаждений, однако при благоприятных условиях окружающей среды плотность популяции *I. acuminatus* может быстро возрасти, что приводит к увеличению вероятности повреждения молодых сосен. *I. acuminatus* – широко распространенный вид в Европе и некоторых районах Азии с географическим ареалом от Средиземноморья до Скандинавии и от Западной Европы до Азии [Cognato, 2015]. Кроме того, *I. acuminatus*, как и другие виды короедов, является переносчиком патогенных видов нематод [Полянина и др., 2019]. Не исключено, что данный вид короеда, обитая под корой дерева, зараженного *B. xylophilus*, также может быть переносчиком этого вида нематод. Исследования в полевых условиях по изучению возможности переноса короедами сосновой стволовой нематоды проводились рядом авторов [Robertson, 2008; Souse et al., 2011], однако однозначного ответа на вопрос, могут ли короеды быть переносчиками высокопатогенного вида нематод *B. xylophilus*, не получено [Bonifacio et al., 2015].

Учитывая вышеизложенное, нами выдвинута гипотеза о возможной ассоциации патогенной нематоды *B. xylophilus*, жука-переносчика *I. acuminatus* и их общего растения-хозяина – сосны *Pinus sylvestris* (Linnaeus, 1753).

Целью исследования стало изучение возможности заселения нематодами *B. xylophilus* вершинного короеда *I. acuminatus* (в контролируемых лабораторных условиях).

Материалы и методика исследования. Для проведения исследования по изучению возможности заражения нематодами *B. xylophilus* вершинного короеда *I. acuminatus* через древесину сосны обыкновенной (*P. sylvestris*) подготовлены два типа древесных образцов сосны (тип I и тип II) длиной 30 см и диаметром 6–10 см.

Подготовка древесных образцов (фрагментов ствола или толстых веток) для эксперимента.

Образцы древесины (I тип) сосны обыкновенной *P. sylvestris* с признаками заселения вершинным короедом *I. acuminatus* (Gyllenhal, 1827) были отобраны в очаге короеда в сосновом бору Брянской области (Фошнянское лесничество, квартал 24, выдел 18) в июле 2022 года. С крупных веток верхушечной части поваленных сосен возрастом 80-100 лет были выпилены 8 образцов длиной 30 см и диаметром 6–10 см, содержащие имаго и личинок вершинного короеда. Идентификация жуков была проведена морфологическим методом [Cognato, 2015].

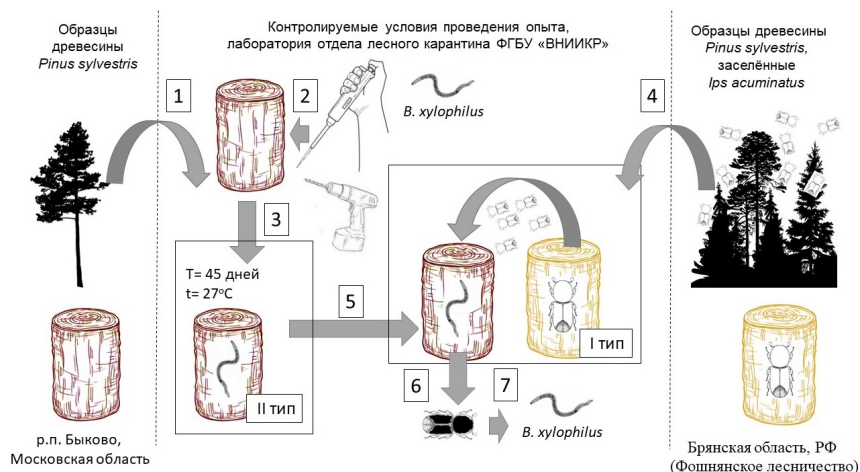


Рис. 1. Схема эксперимента по изучению заражения вершинного короеда *Ips acuminatus* сосновой стволовой нематодой *Bursaphelenchus xylophilus* через зараженные бревна сосны *Pinus sylvestris*

1, 2 – заражение образцов сосны нематодами *B. xylophilus*; 3 – инкубация зараженной *B. xylophilus* древесины сосны в термостате; 4 – внесение в садок древесных образцов сосны, заселенных короедами *I. acuminatus*; 5 – внесение в садок древесных образцов сосны, содержащих нематод *B. xylophilus*; 6 – извлечение жуков *I. acuminatus* из древесных образцов, зараженных нематодой *B. xylophilus*; 7 – выделение нематод из жуков *I. acuminatus*

Fig. 1. Design of the experiment with *Ips acuminatus* infestation with the *Bursaphelenchus xylophilus* nematode through infested *Pinus sylvestris* logs
1, 2 – infestation of pine samples with *B. xylophilus* nematodes; 3 – incubation of pine wood infested with *B. xylophilus* in a thermostat; 4 – introduction of pine wood samples inhabited by *I. acuminatus* bark beetles into the cage; 5 – introduction of pine wood samples containing *B. xylophilus* nematodes into the cage; 6 – extraction of *I. acuminatus* beetles from wood samples infested with the *B. xylophilus* nematode; 7 – extraction of nematodes from *I. acuminatus* beetles

Древесные образцы (II тип) представляли собой фрагменты ствола сосны *P. sylvestris* (длиной 30 см, диаметром 6–10 см), отпиленные от 20-летнего визуально здорового дерева с опытного участка Всероссийского центра карантина растений (р.п. Быково, МО) в конце мая 2022 г. Всего было заготовлено 8 древесных образцов, торцы которых были запарафинированы. Далее в образцы был внесен нематодный инокулюм *B. xylophilus* (BxAm) объемом 400 мкл/образец, содержащий около 3000 нематод. Подсчет и определение нематод производили с использованием стереомикроскопа Carl Zeiss Stemi 508.

Изолят нематод *B. xylophilus* (BxAm) ID, GenBank: OR978580.1 был выделен из древесного упаковочного материала и хранился в лабораторных

условиях в чашке Петри на грибе *Botrytis cinerea* с периодическим (1-2 раза в год) культивированием нематод в ветках сосны.

Инокулюм был введен двумя дозами в два отверстия диаметром 5 мм, просверленные в средней части образца до глубины, равной половине диаметра древесного образца, и расположенные на удалении 10 см от торцов заготовок с двух сторон. После введения инокулюма отверстия были закрыты пленкой «Parafilm М», а фрагменты древесины обернуты в прозрачную пищевую пленку для сохранения влаги и помещены в термостат при температуре 27 °С на 45 суток для размножения в них нематод *B. xylophilus*.

Исследование древесных образцов и жуков вершинного короеда на присутствие нематод.

Все отобранные древесные образцы сосны (тип I) и часть заселявших их короедов *I. acuminatus* (15 особей), а также каждый из образцов типа II были обследованы на наличие в них нематод. Из древесины нематод выделяли вороночным методом Бермана при 24 ч. экспозиции и температуре 20–23 °С.

Нематод, ассоциированных с жуками, получали смывом водой с поверхности имаго короедов путем многократного встряхивания особей, помещенных в пробирку типа «эппендорф» объемом 1,5 мл с дистиллированной водой. Далее содержимое смыва просматривали под стереомикроскопом, а жуков препарировали, отделяя голову, среднегрудь и брюшко и помещая их в отдельные чашки Петри диаметром 6 см на 4-6 часов в воду.

Диагностику выявленных нематод проводили молекулярно-генетическим методом. Всего исследовано на наличие нематод 30 особей жуков *I. acuminatus* и 32 древесные пробы сосны *P. sylvestris*. Для идентификации нематод использовали метод прямого секвенирования по Сэнгеру. Для этого из каждой особи нематод выделяли ДНК с использованием набора серии «ДНК-Экстран 2» Синтол, Россия. С выделенными образцами ДНК проводили классическую ПЦР с праймерами: COI-F1 forward 5'-cct-act-atg-att-ggt-ggt-ttt-ggt-aat-tg-3' и COI-R2 reverse 5'-gta-gca-gca-gta-aaa-taa-gca-cg-3' [Kanzaki, Futai, 2002].

Опыты по изучению возможности переноса сосновой стволовой нематоды *B. xylophilus* короедами рода *Ips* проводили в контролируемых лабораторных условиях.

Результаты исследования и их обсуждение. Видовой состав нематод, выявленных в короедах I. acuminatus и древесине сосны обыкновенной из Брянской обл., до опыта (тип I)

Анализ древесных образцов сосны обыкновенной (I тип), собранных в очаге вершинного короеда (*I. acuminatus*) в Брянской области (до поста-

новки опыта), показал наличие в древесине нематод *Teratorhabditis synpapillata* (Sudhaus, 1985), *Micoletzkyia hylurginophila* (Rühm, 1956), *Micoletzkyia* sp. (табл. 1). Наиболее часто встречались виды рода *Micoletzkyia*. Они зарегистрированы в 75% проанализированных проб. Реже регистрировались нематоды *Teratorhabditis synpapillata* – 13%.

Род *Micoletzkyia* (Chromadorea: Diplogastridae) включает более 20 видов нематод, и большинство из них обнаружены в ходах или непосредственно в короедах Scolytinae (Curculionidae). Данные представители относятся к числу хищных нематод, питаются грибами, бактериями или другими микроорганизмами, а также нематодами [Grucmanova, Holusa, 2013; Susoy, Herrmann, 2014]. Ряд исследователей [Rühm, 1956; Grucmanova, Holusa, 2013] отмечают вершинного короеда *I. acuminatus* как переносчика нематод рода *Micoletzkyia*. А.Ю. Рыссом и С.А. Субботиным имаго и личиночные стадии (dauer juveniles) нематод *Micoletzkyia* spp. выделялись с поверхности разных видов жуков, собранных в Бурятии [Ryss, Subbotin, 2023].

Особи вершинного короеда *I. acuminatus*, отобранные из этих же веток сосны в Брянской области (тип I), были заселены нематодами *Bursaphelenchus doui* (Braasch, Gu, Burgermeister & Zhang, 2005), *Bursaphelenchus paraborgeri* (Wang & Gu, 2012) и *Teratorhabditis synpapillata*. Частота встречаемости первых двух видов в короедах составляла, соответственно, 45% и 50%.

Видовой состав нематод, выявленных в короедах I. acuminatus и древесине сосны обыкновенной, искусственно зараженной B. xylophilus, по окончании опыта (тип II)

При анализе древесины (тип II) после переноса в садок вместе с древесиной, содержащей жуков из Брянской области (тип I), выявлено четыре вида нематод: *Micoletzkyia* sp., *Teratorhabditis synpapillata*, *Bursaphelenchus doui* и *B. xylophilus*. При этом нематоды *B. xylophilus* обнаружены во всех древесных образцах.

Вид *Bursaphelenchus doui*, который не был обнаружен нами ранее в древесине из Брянской области (тип I), но выявлен в самом вершинном короеде, был выделен из древесинных образцов (тип II) впервые в конце опыта, и частота его встречаемости составила 25%. Это первая регистрация видов *Bursaphelenchus doui* (Braasch, Gu, Burgermeister & Zhang, 2004) и *Bursaphelenchus paraborgeri* (Wang & Gu, 2012) для территории Российской Федерации.

Bursaphelenchus doui впервые был выявлен в хвойных древесных упаковочных материалах, поступивших в Китай из Тайваня и Республики Корея [Braasch et al., 2004]. Позже этот вид регистрировался на лиственных породах [Han et al., 2009]. Вид *B. paraborgeri* также был впервые обнару-

жен в древесных упаковочных материалах лиственных пород, импортируемых с грузами в КНР из Малайзии [Wang, Gu, 2009].

На 25 сутки (15.08.2022 г.) после размещения древесины типов I и II в одном садке было установлено, что на древесных образцах, зараженных *B. xylophilus* (тип II), появились признаки заселения короедом. Из-под коры этих образцов были извлечены 15 особей имаго вершинного короеда, из них 12 особей содержали личиночные стадии различных видов нематод. В 7 жуках обнаружены личинки *B. xylophilus*.

В 8 проанализированных жуках *I. acuminatus* родительского поколения (старых особях), извлеченных из древесины типа II, нематод *B. xylophilus* не обнаружено. Смыв водой с поверхности всех просмотренных жуков дал отрицательный результат по содержанию каких-либо нематод.

Анализ 15 особей вершинного короеда в наших исследованиях показал присутствие различных нематод в разных сегментах тела жука (голова – 3%, среднегрудь – 91%, брюшко – 6%), при этом значительная их часть концентрировалась под элитрами. Исследования [Cardoza et al., 2006] также подтверждают, что нематоды локализуются в специализированных транспортных органах под надкрыльями жуков короедов – нематангиях [Полянина и др., 2019].

Нематоды рода *Bursaphelenchus* относятся к числу организмов, которые переносятся насекомыми и трофически связаны с грибами, находящимися в ходах насекомых-переносчиков. Некоторые виды, как, например, *B. mucronatus* и сосновая стволовая нематода *B. xylophilus*, также могут быть ксилофагами и питаться на клетках смоляных каналов [Wingfield et al., 1984]. При этом *B. xylophilus* относится к числу высокопатогенных организмов, способных вызывать быструю гибель древостоев.

Согласно проведенному анализу фитосанитарного риска [Кулинич и др., 2017; Kulinich et al., 1995] потенциальный ареал нематоды *B. xylophilus* – это значительная часть территории РФ. Вершинный короед широко распространен на территории Европы [Knížek, 2011; Cognato, 2015] и Российской Федерации [Кулинич и др., 2022]. Следует отметить, что короед *I. acuminatus* имеет в своем жизненном цикле фазу дополнительного питания, что показывает некоторое сходство с циклом развития черных усачей рода *Monochamus*, которые относятся к основным потенциальным переносчикам нематод *B. xylophilus*. Основываясь на результатах нашего опыта, можно сделать вывод, что теоретически вершинный короед может быть потенциальным переносчиком патогенного организма – сосновой стволовой нематоды *B. xylophilus*.

Таблица 1

Видовой состав и частота встречаемости нематод, выделенных из древесины сосны *Pinus sylvestris* и из населявших её короедов *Ips acuminatus* до опыта и после его завершения

Nematode species and their frequency of occurrence in *Pinus sylvestris* pine wood and in bark beetles *Ips acuminatus* inhabiting these trees before and at the end of the experiment

Виды выделенных нематод	ID номер в GenBank:	Частота встречаемости нематод, экз.			
		до постановки опыта		по окончании опыта	
		Древесина тип I ¹	Жуки <i>Ips acuminatus</i>	Древесина тип II ²	Жуки <i>Ips acuminatus</i>
<i>Micoletzkyia</i> sp.	KJ531145.1	6	0	4	4
<i>M. hylurginophila</i> (Rühm, 1956)	KJ531158.1	2	0	0	0
<i>Teratorhabditis synpapillata</i> Sudhaus, 1985	LN827630.1	1	8	2	3
<i>Bursaphelenchus doui</i> Braasch, Gu, Burgermeister & Zhang, 2005	FJ520228	0	6	2	3
<i>B. paraborgeri</i> Wang & Gu, 2012	HQ727728.1	0	8	0	5
<i>B. xylophilus</i> (Steiner & Buhner, 1934; Nickle, 1970)	OR978580.1	0	0	8	7
Количество проанализированных образцов		8	15	8	15

Примечание:

¹тип I – древесина сосны обыкновенной, заселенная жуками вершинного короеда из очага в Брянской области;

²тип II – древесина сосны обыкновенной, искусственно зараженная *B. xylophilus* для опыта (до опыта не была заселена какими-либо нематодами)

Вершинный короед и *B. xylophilus* имеют схожие температуры развития. Весенний лёт жуков начинается при дневной температуре 10–12 °С во второй-третьей декаде апреля.

В своем развитии от яйца до имаго нематоды проходят четыре личиночные стадии (L₁-L₄). Эмбриональное развитие *B. xylophilus* завершается

за 15–20 ч. Из яйца выходит личинка второго возраста (L_2), которая начинает самостоятельно питаться. Полный жизненный цикл на грибе *Botrytis cinerea* нематода завершает за 12 дней при +15 °С, за 6 дней при +20 °С, за 4–5 дней при +25 °С и за 3 дня при 30 °С [Mamiya, 1975]. Температурные пороги развития *B. xylophilus*, ниже или выше которых нематоды не развиваются, составляют +9,5 °С и +33 °С [Futai, 2008, 2013]. Схожие параметры (климатические факторы, растения-хозяева) и пересекающийся ареал обитания предполагают возможность трансмиссии короедом *I. acuminatus* нематоды *B. xylophilus* при инвазии её на территорию РФ.

Закключение. Проведенные исследования показали возможность заселения сосновой стволовой нематодой *B. xylophilus* жуков *I. acuminatus*. В связи с этим можно предположить возможность трансмиссии патогенного вида нематоды вершинным короедом. Следует также отметить, что в жизненном цикле вершинного короеда присутствует стадия дополнительного питания, в период которой особи активно выгрызают луб, в результате чего нематоды могут перейти из жука в здоровое дерево.

Вклад авторов. О.А. Кулинич, А.А. Чалкин – концептуализация и постановка исследования; Е.Н. Арбузова – культивирование нематод; Н.И. Козырева – проведение молекулярной диагностики; А.А. Чалкин – сбор материала, проведение опытов и анализ результатов исследований; О.А. Кулинич, Н.И. Козырева, Е.А. Арбузова – написание, рецензирование и редактирование текста.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотруднику ФГБУ «ВНИИКР» к.б.н. А.В. Петрову за помощь в идентификации короедов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Гниненко Ю.И., Хегай И.В. Динамика усыхания еловых лесов в Московском регионе // Лесохозяйственная информация. 2018. № 2. С. 65–74. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.07.

Ижевский С.С., Никитский Н.Б., Волков О.Г., Долгин М.М. Иллюстрированный справочник жуков-ксилофагов – вредителей леса и лесоматериалов Российской Федерации. Тула: Гриф и К°, 2005. 218 с.

Керчев И.А., Мандельштам М.Ю., Кривец С.А., Илинский Ю.Ю. Союзный короед *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) – новый чужеродный вид в Западной Сибири // Энтомологическое обозрение. 2019. Т. 98. № 3. С. 592–599. DOI: 10.1134/S0367144519030092.

Кулинич О.А., Козырева Н. И., Арбузова Е. Н. Сосновая стволовая нематода как угроза хвойным насаждениям России // Лесохозяйственная информация. 2017. № 3. С. 50-66. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2017.3.05.

Кулинич О.А., Чалкин А.А., Ряскин Д.И., Арбузова Е.Н., Козырева Н.И., Петров А.В. Распространение и карантинный статус короедов рода *Ips* для России и других стран мира // Защита и карантин растений. 2022. № 4. С. 27–31. DOI: 10.47528/1026-8634_2022_4_27.

Полянина К.С., Мандельштам М.Ю., Рысс А.Ю. Краткий обзор ассоциаций ксилобионтных нематод с жуками-короедами (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) // Энтомологическое обозрение. 2019. Т. 98. № 3. С. 481–499. DOI: 10.1134/S0367144519030031.

Akbulut S., Stamps W.T. Insect vectors of the pinewood nematode: a review of the biology and ecology of *Monochamus* species // Forest Pathology. 2012. No. 42. P. 89–99. DOI: 10.1111/j.1439-0329.2011.00733.x.

Bonifácio L., Naves P., Sousa E. Vector-Plant // Pine wilt disease in Europe – biological interactions and integrated management. Lisbon: FNAPF-Federação Nacional das Associações de Proprietários Florestais, 2015. P. 125–158.

Braasch H., Gu J., Burgermeister W., Zhang J. *Bursaphelenchus doui* sp. n. (Nematoda: Parasitaphelenchidae) in packaging wood from Taiwan and South Korea—a new species of the xylophilus group // Russian Journal of Nematology. 2005. No. 13(1). P. 19.

Cardoza Y., Paskewitz S., Raffa K. Travelling through time and space on wings of beetles: a tripartite insect–fungi–nematode association // Symbiosis. 2006. No. 41. P. 71–79.

Cognato A.I. Biology, systematics, and evolution of *Ips* // Bark beetles. San Diego: Academic Press, 2015. P. 351–370.

EPPO Standard on diagnostics PM 7/4 (4) *Bursaphelenchus xylophilus* // EPPO Bulletin. 2023. No. 53. P. 156–183. DOI: 10.1111/epp.12915.

Fonseca L., Cardoso J. M. S., Lopes A., Pestana M., Abreu F., Nunes N., Mota M., Abrantes I. The pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in Madeira Island // Helminthologia. 2012. No. 49. P. 96–103. DOI: 10.2478/s11687-012-0020-3.

Futai K. Pine Wilt in Japan: From First Incidence to Present // Pine Wilt Disease. Tokyo: Springer, 2008. P. 5–13. DOI: 10.1007/978-4-431-75655-2_2.

Futai K. Pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. Annu // Rev. Phytopathol. 2013. No. 51. P. 61–83. DOI: 10.19080/IJESNR.2018.12.555848.

Grucmanova S., Holusa J. Nematodes associated with bark beetles, with focus on the genus *Ips* (Coleoptera: Scolytinae) in central Europe // Acta Zoologica Bulgarica. 2013. No. 65. P. 547–556.

Han H., Chung Y. J., Shin S. C. First report of *Bursaphelenchus doui* on tulip tree (*Liriodendron tulipifera*) in Korea // Plant Disease. 2009. No. 93 (11). P. 1221–1221. DOI: 10.1094/PDIS-93-11-1221C.

Hlávková D., Doležal P. Cambioxylophagous pests of Scots pine: ecological physiology of European populations // Front. For. Glob. Change. 2022. DOI: 10.3389/ffgc.2022.864651.

Inácio M.L., Nobrega F., Vieira P., Bonifacio L., Naves P., Sousa E., Mota M. First detection of *Bursaphelenchus xylophilus* associated with *Pinus nigra* in Portugal and in Europe // Forest pathology. 2015. Vol. 45(3). P. 235–238. DOI: 10.1111/efp.12162.

Jikumaru S., Togashi K. Boarding abilities of *Bursaphelenchus mucronatus* and *B. xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae) on *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae) // Nematology. 2003. Vol. 5(6). P. 843–849. DOI: 10.1163/156854103773040745.

Kanzaki N., Futai K. A PCR primer set for determination of phylogenetic relationships of *Bursaphelenchus* species within the *xylophilus* group // Nematology. 2002. No. 4(1). P. 35–41. DOI: 10.1163/156854102760082186.

Kirkendall L.R. Sperm is a limiting resource in the pseudogamous bark beetle *Ips acuminatus* (Scolytidae) // Oikos. 1990. No. 57. P. 80–87. DOI: 10.2307/3565740.

Knížek M. Curculionidae: Scolytinae // Catalogue of palaearctic Coleoptera. Stenstrup: Apollo Books, 2011. P. 204–251

Kulinich O.A., Kolossova N.V. The potential of the pinewood nematode *Bursaphelenchus xylophilus* to become established in countries of the former USSR // Russian Journal of Nematology. 1995. No. 3(1). P. 35–48.

Linit M. Nematode-vector relationships in the pine wilt disease system // Journal of Nematology. 1988. No. 20. P. 227–235.

Linsley E.G., Chemsak J.A. The Cerambycidae of North America, Part VII, No. 1: Taxonomy and Classification of the Subfamily Lamiinae, Tribes Parmenini through Acanthoderini. University of California Publications in Entomology, 102. Berkeley and Los Angeles, California: University of California Press, 1984. 258 p.

Mamiya Y. The life history of the pinewood nematode *Bursaphelenchus lignicolus* // Japanese Journal of Nematology. 1975. No. 5. P. 16–25. DOI: 14855/jjn1972.5.16.

Mota M.M., Braasch H., Bravo M.A., Penas A.C., Burgermeister W., Metge K., Sousa E. First report of *Bursaphelenchus xylophilus* in Portugal and in Europe // Nematology. 1999. Vol. 1(7). P. 727–734. DOI: 10.1163/156854199508757.

Necibi S., Linit M.J. Effect of *Monochamus carolinensis* on *Bursaphelenchus xylophilus* dispersal stage formation // Journal of Nematology. 1998. No. 30. P. 246–254.

Robertson L., García-Álvarez A., Arcos S.C., Díez-Rojo M.A., Mansilla J.P., Sanz R., Martínez C., Escuer M., Castresana L., Notario A., Bello A., Arias M. Potential insect vectors of *Bursaphelenchus* spp. (Nematoda: Parasitaphelenchidae) in Spanish pine forests // Pine wilt disease: a worldwide threat to forest ecosystems. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. P. 221–234. DOI: 10.1007/978-1-4020-8455-3_19.

Rühm W. Di Nematoden der Ipiden // Parasitologische Schriftenreihe. Vol. 6. Iena: Gustav Fischer Verlag, 1956. 437 p.

Ryss A.Y., Subbotin S.A. New Records of Wood-and Bark-Inhabiting Nematodes from Woody Plants with a Description of *Bursaphelenchus zvyagintsevi* sp. n. (Aphelenchoididae: Parasitaphelenchinae) from Russia // Plants. 2023. Vol. 12(1). P. 382. DOI: 10.3390/plants12020382

Siitonen J. *Ips acuminatus* kills pines in southern Finland // Silva Fennica. 2014. No. 48(4). P. 1145. DOI: 10.14214/sf.1145

Sone K., Nagano S.I., Hata K. Abundance-dependent transmission of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae), to the

Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae), adult in its pupal chamber // Journal of Forest Research. 2011. No. 16. P. 82–86.

Sousa E., Rodrigues J.M., Bonifácio L.F., Naves P.M., Rodrigues A. Management and control of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in Portugal // Nematodes: Morphology, functions and management strategies. 2011. P. 157–178.

Susoy V., Herrmann M. Preferential host switching and codivergence shaped radiation of bark beetle symbionts, nematodes of *Micoletzkyia* (Nematoda: Diplogastriidae) // Journal of Evolutionary Biology. 2014. No. 27. P. 889–898. DOI: 10.1111/jeb.12367.

Togashi K., Jikumaru S. Evolutionary change in a pine wilt system following the invasion of Japan by the pinewood nematode // *Bursaphelenchus xylophilus*. Ecological Research. 2007. No. 22. P. 862–868. DOI: 10.1007/s11284-007-0339-2.

Vicente C., Espada M., Vieira P., Mota M. Pine wilt disease: a threat to European forestry // European Journal of Plant Pathology. 2012. No. 133. P. 89–99. DOI: 10.1007/s10658-011-9924-x.

Wang J., Gu J. *Bursaphelenchus paraburgeri* sp. n. (Nematoda: Parasitaphelenchidae) in packaging wood from Malaysia // Nematology. 2012. No. 14(1). P. 39–50. DOI: 10.1163/138855411X575449.

Webster J., Mota M.M. Pine wilt disease: global issues, trade and economic impact // Pine wilt disease: a worldwide threat to forest ecosystems. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008. P. 1–3.

Wingfield M.J., Blanchette R.A., Nicholls T.H. Is the pine wood nematode an important pathogen in the United States? // Journal of Forestry. 1984. No. 82. P. 232–235. DOI: 10.1139/x83-143.

Yang B., Wang Q. Distribution of the pinewood nematode in China and susceptibility of some Chinese and exotic pines to the nematode // Canadian Journal of Forest Research. 1989. No. 19. P. 1527–1530. DOI: 10.1139/x89-232

References

Akbulut S., Stamps W.T. Insect vectors of the pinewood nematode: a review of the biology and ecology of *Monochamus* species. *Forest Pathology*, 2012, no. 42, pp.89–99. DOI: 10.1111/j.1439-0329.2011.00733.x.

Bonifácio L., Naves P., Sousa E. Vector-Plant. Pine wilt disease in Europe – biological interactions and integrated management. Lisbon: FNAPF-Federação Nacional das Associações de Proprietários Florestais, 2015, pp. 125–158.

Braasch H., Gu J., Burgermeister W., Zhang J. *Bursaphelenchus doui* sp. n. (Nematoda: Parasitaphelenchidae) in packaging wood from Taiwan and South Korea—a new species of the *xylophilus* group. *Russian Journal of Nematology*, 2005, no. 13(1), p. 19.

Cardoza Y., Paskewitz S., Raffa K. Travelling through time and space on wings of beetles: a tripartite insect–fungi–nematode association. *Symbiosis*, 2006, no. 41, pp.71–79.

Cognato A.I. Biology, systematics, and evolution of *Ips*. *Bark beetles*. San Diego: Academic Press, 2015, pp. 351–370.

EPPO Standard on diagnostics PM 7/4 (4) *Bursaphelenchus xylophilus*. EPPO Bulletin, 2023, no. 53, pp. 156–183. DOI: 10.1111/epp.12915.

Fonseca L., Cardoso J. M. S., Lopes A., Pestana M., Abreu F., Nunes N., Mota M., Abrantes I. The pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in Madeira Island. *Helminthologia*, 2012, no. 49, pp. 96–103. DOI: 10.2478/s11687-012-0020-3.

Futai K. Pine Wilt in Japan: From First Incidence to Present. *Pine Wilt Disease*. Springer: Tokyo, 2008, pp. 5–13. DOI: 10.1007/978-4-431-75655-2_2.

Futai K. Pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*. *Annu. Rev. Phytopathol.*, 2013, no. 51, pp. 61–83. DOI: 10.19080/IJESNR.2018.12.555848.

Gninenko Yu.I., Khegay I.V. Dynamics of drying out of spruce forests in the Moscow region. *Forestry information*, 2018, no. 2, pp. 65–74. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2018.2.07. (In Russ.)

Grucmanova S., Holusa J. Nematodes associated with bark beetles, with focus on the genus *Ips* (Coleoptera: Scolytinae) in central Europe. *Acta Zoologica Bulgarica*, 2013, no. 65, pp. 547–556.

Han H., Chung Y. J., Shin S. C. First report of *Bursaphelenchus doui* on tulip tree (*Liriodendron tulipifera*) in Korea. *Plant Disease*, 2009, no. 93 (11), pp. 1221–1221. DOI: 10.1094/PDIS-93-11-1221C.

Hlávková D., Doležal P. Cambioxylophagous pests of Scots pine: ecological physiology of European populations—a review. *Front. For. Glob. Change*, 2022. DOI: 10.3389/ffgc.2022.864651.

Inácio M.L., Nobrega F., Vieira P., Bonifacio L., Naves P., Sousa E., Mota M. First detection of *Bursaphelenchus xylophilus* associated with *Pinus nigra* in Portugal and in Europe. *Forest pathology*, 2015, vol. 45(3), pp. 235–238. DOI: 10.1111/efp.12162.

Izhevsky S.S., Nikitskiy N.B., Volkov O.G., Lolgin M.M. Illustrated reference book of xylophagous beetles – pests of forests and timber of the Russian Federation. Tula: Grif and Ko, 2005. 218 p. (In Russ.)

Jikumaru S., Togashi K. Boarding abilities of *Bursaphelenchus mucronatus* and *B. xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae) on *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae). *Nematology*, 2003, vol. 5(6), pp. 843–849. DOI: 10.1163/156854103773040745.

Kanzaki N., Futai K. A PCR primer set for determination of phylogenetic relationships of *Bursaphelenchus* species within the *xylophilus* group. *Nematology*, 2002, no. 4(1), pp. 35–41. DOI: 10.1163/156854102760082186.

Kerchev I.A., Mandelstam M.Yu., Krivets S.A., Ilinsky Yu.Yu. Allied bark beetle *Ips amitinus* (Eichhoff, 1872) (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) – a new alien species in Western Siberia. *Entomological Review*, 2019, no. 98(3), pp. 592–599. DOI: 10.1134/S0367144519030092. (In Russ.)

Kirkendall L.R. Sperm is a limiting resource in the pseudogamous bark beetle *Ips acuminatus* (Scolytidae). *Oikos*, 1990, no. 57, pp. 80–87. DOI: 10.2307/3565740.

Knížek M. Curculionidae: Scolytinae. *Catalogue of palaearctic Coleoptera*, Stenstrup: Apollo Books, 2011, pp. 204–251.

Kulinich O.A., Chalkin A.A., Ryaskin D.I., Arbuzova E.N., Kozyreva N.I., Petrov A.V. Distribution and quarantine status of bark beetles of the genus *Ips* for Russia and other countries of the world. *Plant Protection and Quarantine*, 2022, no. 4, pp. 27–31. DOI: 10.47528/1026-8634_2022_4_27. (In Russ.)

Kulinich O.A., Kolossova N.V. The potential of the pinewood nematode *Bursaphelenchus xylophilus* to become established in countries of the former USSR. *Russian Journal of Nematology*, 1995, no. 3(1), pp. 35–48.

Kulinich O.A., Kozyreva N.I., Arbuzova E.N. Pinewood nematode as a threat to coniferous in Russia. *Forestry information*, 2017, no. 3, pp. 50–66. DOI: 10.24419/LHI.2304-3083.2017.3.05. (In Russ.)

Linit M. Nematode-vector relationships in the pine wilt disease system. *Journal of Nematology*, 1988, no. 20, pp. 227–235.

Linsley E.G., Chemsak J.A. The Cerambycidae of North America, Part VII, No. 1: Taxonomy and Classification of the Subfamily Lamiinae, Tribes Parmenini through Acanthoderini. University of California Publications in Entomology, 102. Berkeley and Los Angeles, California: University of California Press, 1984. 258 p.

Mamiya Y. The life history of the pinewood nematode *Bursaphelenchus lignicolus*. *Japanese Journal of Nematology*, 1975, no. 5, pp. 16–25. DOI: 14855/jjn1972.5.16.

Mota M. M., Braasch H., Bravo M. A., Penas A. C., Burgermeister W., Metge K., Sousa E. First report of *Bursaphelenchus xylophilus* in Portugal and in Europe. *Nematology*, 1999, vol. 1(7), pp. 727–734. DOI: 10.1163/156854199508757.

Necibi S., Linit M.J. Effect of *Monochamus carolinensis* on *Bursaphelenchus xylophilus* dispersal stage formation. *Journal of Nematology*, 1998, no. 30, pp. 246–254.

Polyanina K.S., Mandelstam M.Yu., Ryss A.Yu. Brief review of associations of xylobiont nematodes with bark beetles (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae). *Entomological Review*, 2019, vol. 98(3), pp. 481–499. DOI: 10.1134/S0367144519030031. DOI: 10.1134/S0367144519030031. (In Russ.)

Robertson L., García-Álvarez A., Arcos S.C., Díez-Rojo M.A., Mansilla J.P., Sanz R., Martínez C., Escuer M., Castresana L., Notario A., Bello A., Arias M. Potential insect vectors of *Bursaphelenchus* spp. (Nematoda: Parasitaphelenchidae) in Spanish pine forests. *Pine wilt disease: a worldwide threat to forest ecosystems*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008, pp. 221–234. DOI: 10.1007/978-1-4020-8455-3_19.

Rühm W. Di Nematoden der Ipiden. *Parasitologische Schriftenreihe*, vol. 6. Iena: Gustav Fischer Verlag, 1956. 437 p.

Ryss A.Y., Subbotin S.A. New Records of Wood-and Bark-Inhabiting Nematodes from Woody Plants with a Description of *Bursaphelenchus zvyagintsevi* sp. n. (Aphelenchoididae: Parasitaphelenchinae) from Russia. *Plants*, 2023, vol. 12(1), p. 382. DOI: 10.3390/plants12020382

Siitonen J. *Ips acuminatus* kills pines in southern Finland. *Silva Fennica*, 2014, no. 48(4), p. 1145. DOI: 10.14214/sf.1145

Sone K., Nagano S.I., Hata K. Abundance-dependent transmission of the pinewood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus* (Nematoda: Aphelenchoididae), to

the Japanese pine sawyer, *Monochamus alternatus* (Coleoptera: Cerambycidae), adult in its pupal chamber. *Journal of Forest Research*, 2011, no. 16, pp. 82–86.

Sousa E., Rodrigues J.M., Bonifácio L.F., Naves P.M., Rodrigues A. Management and control of the pine wood nematode, *Bursaphelenchus xylophilus*, in Portugal. *Nematodes: Morphology, functions and management strategies*, 2011, pp. 157–178.

Susoy V., Herrmann M. Preferential host switching and codivergence shaped radiation of bark beetle symbionts, nematodes of *Micoletzkyia* (Nematoda: Diplogastriidae). *Journal of Evolutionary Biology*, 2014, no. 27, pp. 889–898. DOI: 10.1111/jeb.12367.

Togashi K., Jikumaru S. Evolutionary change in a pine wilt system following the invasion of Japan by the pinewood nematode. *Bursaphelenchus xylophilus*. *Ecological Research*, 2007, no. 22, pp. 862–868. DOI: 10.1007/s11284-007-0339-2.

Vicente C., Espada M., Vieira P., Mota M. Pine wilt disease: a threat to European forestry. *European Journal of Plant Pathology*, 2012, no. 133, pp. 89–99. DOI: 10.1007/s10658-011-9924-x.

Wang J., Gu J. *Bursaphelenchus paraburgeri* sp. n. (Nematoda: Parasitaphelenchidae) in packaging wood from Malaysia. *Nematology*, 2012, no. 14(1), pp. 39–50. DOI: 10.1163/138855411X575449.

Webster J., Mota M.M. Pine wilt disease: global issues, trade and economic impact. *Pine wilt disease: a worldwide threat to forest ecosystems*. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008, pp. 1–3.

Wingfield M.J., Blanchette R.A., Nicholls T.H. Is the pine wood nematode an important pathogen in the United States? *Journal of Forestry*, 1984, no. 82, pp. 232–235. DOI: 10.1139/x83-143.

Yang B., Wang Q. Distribution of the pinewood nematode in China and susceptibility of some Chinese and exotic pines to the nematode. *Canadian Journal of Forest Research*, 1989, no. 19, pp. 1527–1530. DOI: 10.1139/x89-232

Материал поступил в редакцию 23.02.2024

Чалкин А.А., Кулинич О.А., Козырева Н.И., Арбузова Е.Н. К изучению роли вершинного короеда *Ips acuminatus* в трансмиссии фитопатогенных нематод рода *Bursaphelenchus* // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 123–140. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.123-140

Одна из потенциальных угроз для хвойных лесов Российской Федерации – распространение вилта хвойных пород, вызываемого сосновой стволовой нематодой *Bursaphelenchus xylophilus*. Данный карантинный организм пока не выявлен в России, но распространен в соседних странах: Китае, Японии, Южной Кореи. В естественных сосновых насаждениях распространение *B. xylophilus*

осуществляется усачами рода *Monochamus*, однако увядающие деревья также заселяются другими видами насекомых-ксилофагов, в частности, короедами рода *Ips*. Представлены результаты исследований, проведенных в контролируемых лабораторных условиях, по возможности переноса вершинным короедом *Ips acuminatus* нематод *B. xylophilus*. С этой целью два типа бревен сосны (*Pinus sylvestris*), заселенные короедом *I. acuminatus* (I тип) и искусственно зараженные *B. xylophilus* (II тип), были помещены вместе в один садок. В результате установлено, что жуки заселили зараженные нематодой бревна сосны, а через 25 суток 47% отродившихся в зараженной древесине молодых жуков содержали личинок нематод *B. xylophilus*. Кроме этого вида, в жуках и древесине были выявлены нематоды *B. paraburgeti*, *B. doui*, а также *Teratorhabditis synapillata*, *Micoletzkyia synapillata*. Идентификация нематод проводилась с применением молекулярно-генетических методов диагностики. Наибольшее количество нематод в жуках (91%) находилось в среднегрудном отделе короедов под надкрыльями. При проведении смыва водой с поверхности жуков нематод не зафиксировано. Результаты исследований дают основание предполагать, что вершинный короед *I. acuminatus* может быть переносчиком патогенных нематод *B. xylophilus*.

Ключевые слова: *Ips acuminatus*, короед, *Bursaphelenchus xylophilus*, сосновая стволовая нематода, *Pinus sylvestris*.

Chalkin A.A., Kulinich O.A., Kozyreva N.I., Arbuzova E.N. The research of the role of the sharp-toothed bark beetle *Ips acuminatus* in the transmission of phytopathogenic nematodes of the genus *Bursaphelenchus*. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 123–140 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.123-140

One of the potential threats to coniferous forests of the Russian Federation is the spread of pine wilt disease caused by the pinewood nematode *Bursaphelenchus xylophilus*. This quarantine organism has not yet been detected in Russia, but is widespread in neighbouring countries: China, Japan, South Korea. In natural pine plantations the spreading of *B. xylophilus* is carried out by *Monochamus* beetles, but stressed trees are also infected by other insects, in particular by bark beetles of the genus *Ips*. The results of studies conducted under controlled laboratory conditions on the possibility of transfer of *B. xylophilus* nematodes by the bark beetle *Ips acuminatus* are presented. For this purpose, two types of pine (*Pinus sylvestris*) logs with *I. acuminatus* (type I) and artificially infested with *B. xylophilus* (type II) were placed together in one cage. *I. acuminatus* beetles were found in nematode-infested pine logs, and after 25 days, 47% of the emerging beetles in the infested wood contained the *B. xylophilus* juveniles. The nematodes *B. paraburgeti*, *B. doui*, *Teratorhabditis synapillata*, *Micoletzkyia synapillata* were also found in *I. acuminatus* beetles and wood. The nematodes were identified using molecular genetic diagnostic methods.

The highest number of nematodes in beetles (91%) was found in the mid-thoracic section of bark beetles under the elytra. No nematodes were found in the beetles during water flushing from the beetle surface. The results suggest that the bark beetle *I. acuminatus* may be a vector by pathogenic nematodes *B. xylophilus*.

Keywords: *Ips acuminatus*, bark beetle, *Bursaphelenchus xylophilus*, pinewood nematode, *Pinus sylvestris*.

ЧАЛКИН Андрей Андреевич – научный сотрудник отдела лесного карантина ФГБУ «ВНИИКР». ORCID: 0000-0002-7937-4667. SPIN-код: 8575-3984. Web of Science Researcher ID: AET-9683-2022. Scopus AuthorID: 57220116459.

140150, ул. Пограничная, д. 32, р. п. Быково, г. о. Раменский, Московская обл., Россия. E-mail: chalkin10@ya.ru

CHALKIN Andrey A. – Researcher at the Forest Quarantine Department of the Federal State Budgetary Institution «VNIICR». ORCID: 0000-0002-7937-4667. SPIN-code: 8575-3984. Web of Science Researcher ID: AET-9683-2022. Scopus Author ID: 57220116459.

140150. Pogranichnaya str. 32. Bykovo. Ramensky district. Moscow region. Russia. E-mail: chalkin10@ya.ru

КУЛИНИЧ Олег Андреевич – главный научный сотрудник, начальник отдела лесного карантина ФГБУ «ВНИИКР», доктор биологических наук. ORCID: 0000-0002-7531-4982. SPIN-код: 7656-5245. Web of Science Researcher ID: A-5534-2016. Scopus Author ID: 11940984400.

140150, ул. Пограничная, д. 32, р. п. Быково, г. о. Раменский, Московская обл., Россия. E-mail: okulinich@mail.ru

KULINICH Oleg A. – DSc (Biological), Chief Scientific Associate, Head of Forest Quarantine Department of the Federal State Budgetary Institution «VNIICR». ORCID: 0000-0002-7531-4982. SPIN-code: 7656-5245. Web of Science Researcher ID: A-5534-2016. Scopus Author ID: 11940984400.

140150. Pogranichnaya str. 32. Bykovo. Ramensky district. Moscow region, Russia. E-mail: okulinich@mail.ru

КОЗЫРЕВА Наталья Ивановна – научный сотрудник отдела лесного карантина ФГБУ «ВНИИКР», кандидат биологических наук. ORCID: 0000-0002-1659-0258. SPIN-код: 6645-9389. Web of Science Researcher ID: JWP-5077-2024. Scopus Author ID: 57190217222.

140150, ул. Пограничная, д. 32, р. п. Быково, г. о. Раменский, Московская обл., Россия. E-mail: nkozyreva014@gmail.com

KOZYREVA Natalya I. – PhD (Biological), Researcher at the Forest Quarantine Department of the Federal State Budgetary Institution «VNIKR». ORCID: 0000-0002-1659-0258. SPIN-code: 6645-9389. Web of Science Researcher ID: JWP-5077-2024. Scopus Author ID: 57190217222.

140150, Pogranichnaya str. 32, Bykovo, Ramensky district, Moscow region, Russia. E-mail: nkozyreva014@gmail.com

АРБУЗОВА Елена Николаевна – старший научный сотрудник отдела лесного карантина ФГБУ «ВНИИКР», кандидат биологических наук. ORCID: 0000-0002-0547-2547. SPIN-код: 3315-4190. Web of Science Researcher ID: I-7153-2015. Scopus Author ID: 57222500674.

140150, ул. Пограничная, д. 32, р. п. Быково, г. о. Раменский, Московская обл., Россия. E-mail: e.n.arbuzova@mail.ru

ARBUSOVA Elena N. – PhD (Biological), Senior Researcher at the Forest Quarantine Department of the Federal State Budgetary Institution «VNIKR». ORCID: 0000-0002-0547-2547. SPIN-code: 3315-4190. Web of Science Researcher ID: I-7153-2015. Scopus Author ID: 57222500674.

140150, Pogranichnaya str. 32, Bykovo, Ramensky district, Moscow region, Russia. E-mail: e.n.arbuzova@mail.ru

С.В. Коптев, Х. Алабдуллахалхасно

**ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ И ДИНАМИКИ ЛЕСОВ
АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ
С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ТЕХНОЛОГИЙ
ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Введение. Леса являются одним из наиболее важных возобновляемых природных ресурсов, представляя значимый источник биоразнообразия и экономических благ [Powell et al., 2013; Russian forests..., 2020]. Ухудшение состояния лесного покрова служит индикатором экологических проблем; для их оценки существует множество методов. Среди них выделяются технологии дистанционного зондирования как один из ключевых современных инструментов, применяемых в сфере охраны и защиты природных ресурсов. Эти технологии обеспечивают точную информацию о состоянии лесов [Никитина, 2018; Study..., 1998].

Разнообразие и качество материалов дистанционного зондирования значительно выросло за последние несколько лет, что облегчило их использование при составлении топографических карт, земельных кадастров, экологической оценке растительности, изучении динамики объектов и природных явлений [Сутырина, 2013; Учебно-методическая документация..., 2015].

В этом контексте было разработано множество вегетационных спектральных индексов, большинство из которых зависят от различий между красным (RED) и ближним инфракрасным (NIR) диапазонами [Tripathi, 2020]. Эти индексы широко использовались для получения характеристик растительного покрова более трех десятилетий. Разработка и усовершенствование этих индексов продолжают и, соответственно, требуют новых научных исследований [Al-Rahili, 2003]. Кроме того, разработаны современные технологии и инструменты, такие как использование лазерного сканирования для анализа и определения состояния лесов [Никитина, 2018].

Нормализованный разностный вегетационный индекс NDVI считается одним из наиболее распространенных показателей, применяемых для исследования лесов [Gandhi et al., 2015]. Кроме того, в последнее время

появились так называемые биофизические показатели, которые являются ключевыми при использовании материалов ДЗЗ для описания и определения темпов испарения влаги и обмена энергией в растительном покрове Земли, а также при определении общей биомассы растений [Fassnacht et al., 2023].

Леса сухопутной территории Арктики Архангельской области имеют важное значение в экономике региона как источник сырьевых ресурсов, играют большую роль в защите континента от северных ветров. Здесь произрастают уникальные массивы старовозрастных лесов [Gromtsev, 2002].

К наиболее существенным проблемам лесов северотаежного региона в последние десятилетия относятся преобладающее чрезмерное использование природных ресурсов, изменение климата, а также пожары, ветровалы. В связи с обширностью и сложностью таежных экосистем довольно затруднительно проводить непосредственное наблюдение за происходящими процессами [Барталев и др., 2011]. Отсюда вытекает важность проведения исследований в области использования технологий дистанционного зондирования, которые позволяют оперативно оценивать текущее состояние лесов в крупных масштабах и разрабатывать необходимые мероприятия по устойчивому лесопроизводству.

Цели исследования. Исследование проведено с целью оценки изменений лесного покрова и физиологического и санитарного состояния лесов северотаежного района сухопутной территории Арктики Архангельской области с использованием обработки изображений со спутников Landsat 8 и Sentinel-2.

Снимки со спутника Landsat 8 использовались для расчета индекса NDVI; биофизические показатели и индекс PSRI были рассчитаны путем анализа и обработки снимков со спутника Sentinel-2.

Объекты и методы исследования. Объект исследования расположен на территории сухопутной зоны Арктики Архангельской области в пределах орбиты спутника Landsat 8 по пути (Path) 179 и ряду (Row) 15 (63°N 43°E,) (рис. 1).

Исследуемая территория относится к зоне притундровых лесов. Следует отметить, что большинство лесных насаждений относится к смешанным по составу. Средний состав насаждений – 4,6Е 2,5Б 2,4С 0,3Ос 0,2 Лц¹.

¹ Лесохозяйственный регламент Мезенского лесничества Архангельской области (ред. от 09.11.2022 г. № 24п).

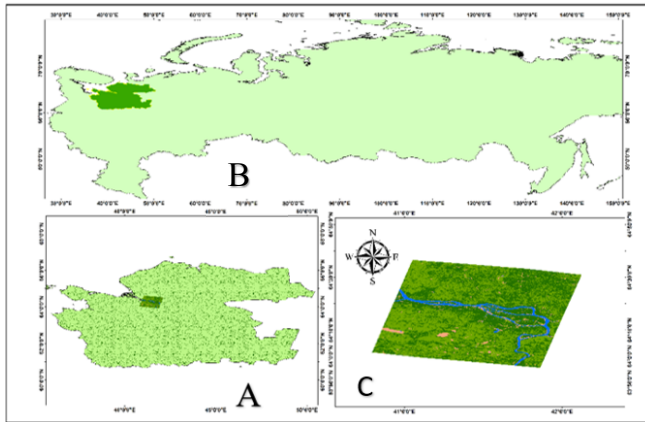


Рис. 1. Район исследований (А – в Архангельской области, В – на территории России, С – объект исследования)

Fig. 1. Research area (A – in the Arkhangelsk region, B – in Russia, C – research territory)

Спектральные показатели растительного покрова.

Индекс нормализованной разности вегетационного покрытия NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) является одним из ключевых показателей для различения растительных покровов и определения их состояния и плотности. Расчет этого индекса основан на разнице в спектральном отражении между видимым красным и ближним инфракрасным диапазонами [Алшаиби, 2017; Normalized Difference Vegetation Index, 2014]. Он рассчитывается по следующему уравнению:

$$NDVI = \frac{NIR + R}{NIR - R}, \quad (1)$$

где NIR – ближний инфракрасный диапазон; R – видимый красный диапазон.

Значения этого индекса колеблются в пределах от –1 до +1, где отрицательные значения указывают на наличие водной поверхности, значения, близкие к нулю – на скалистые участки и почву без растительного покрытия, а положительные значения – на наличие растительности [Rouse et al., 1974].

Индекс отражения старения растений (PSRI – Plant Senescence Reflectance Index) количественно характеризует состояние растительности, подвергаемой негативному воздействию. Индикатор находит применение для различных целей, включая мониторинг санитарного состояния лесов, определение их физиологического стресса. Стресс растений оценивается

на основе эффективности использования растениями фотосинтетической части солнечного света. Увеличение индикатора указывает на негативное воздействие [Gao et al., 2020].

Значения PRSI варьируют в пределах от -1 до +1, где отрицательные значения, как правило, указывают на хорошее состояние лесных насаждений [Khorrami, Kamran, 2022].

Биофизические индикаторы необходимы для оценки физиологического состояния растительности, а также для понимания динамики экосистемы [Gupta, Pandey, 2021]. Они являются ключевыми для оценки ресурсов и моделирования процессов обмена веществ и энергии между экосистемами лесов, атмосферой и гидросферой [Барталев и др., 2011]. Биофизические индексы включают:

- *Индекс площади листовой поверхности* (LAI – Leaf Area Index) – показатель, используемый для описания структуры полога насаждений, характеристики степени продуктивности условий произрастания насаждений, оценки процесса испарения и энергообмена растительности с землей. Данный индекс определяется как отношение односторонней суммарной площади поверхности листьев к единице поверхности Земли. Значения индекса LAI варьируют от 0 до 7. Чем ближе значение LAI к 7, тем выше сомкнутость крон [Weiss, Baret, 2016];

- *Индикатор доли зеленого растительного покрова* (CCC – Canopy Chlorophyll Content) отражает соотношение площади зеленого растительного покрова на данной территории и общей площади суши. Значения индикатора колеблются от 0 (открытая почва) до 600 (сомкнутый растительный покров) [García-Álvarez, Lara Hinojosa, 2022];

- *Индикатор содержания хлорофилла* (FCOVER – Fraction of Green Vegetation Cover) считается одним из наиболее важных индикаторов, характеризующих состояние насаждений. Значение индикатора колеблется от 0 до 1. Высокие значения указывают на высокую интенсивность фотосинтеза и, соответственно, хорошее состояние насаждений [Weiss, Baret, 2016]. Также данный индикатор характеризует количество азота в почве.

Непосредственное измерение этих показателей является сложной задачей и требует значительных усилий, поэтому были разработаны алгоритмы для их расчета, основанные на применении нейронных сетей (ANN), что считается самым современным и эффективным для определения перечисленных показателей [Xie et al., 2019; Gupta, Pandey, 2021].

Показатель NDVI рассчитывали на основе спутниковых изображений Landsat 8, полученных с веб-сайта Геологической службы США USGS за

летние месяцы 2013 и 2022 года (использовались снимки с низкой долей облаков). Программа ArcGIS 10.3 использовалась для проведения анализов и мониторинга изменений в лесном покрове. Полученные снимки были отображены в соответствии с системой координат UTM_38N (проекция Меркатора), а затем преобразованы в глобальную географическую координатную систему WGS 84.

Мониторинг изменений растительного покрова часто включает анализ разностей между изображениями одной территории за разные периоды времени [Meneses-Tovar, 2009; Al-Mousawi, 2014]. Одним из методов мониторинга является классификация территории с вычислением площади каждой категории за разные годы для последующего расчёта изменений [Reis, 2008]. Другой метод основан на классификации пикселей космических снимков с использованием морфологического анализа для выявления изменений [Денисова и др., 2020].

В данном исследовании был использован метод классификации на основе индексов NDVI и PSRI. Классы, основанные на значениях индекса NDVI, отражены в табл. 1. После классификации были определены доли площади каждого полученного класса относительно общей площади объекта исследования.

Таблица 1

Классификация космических изображений после расчета NDVI
Classification and separation of satellite images after NDVI calculation

Класс	Диапазон NDVI
1	NDVI < 0
2	0 < NDVI < 0,2
3	0,2 < NDVI < 0,35
4	NDVI > 0,35

Индекс PSRI был рассчитан с использованием снимков с космического аппарата Sentinel-2 и программного обеспечения SNAP 9 (Sentinel Application Platform) с использованием инструмента «band math's». Расчет осуществлялся с использованием уравнения (2):

$$PSRI = \frac{B4 - B2}{B6}, \quad (2)$$

где B2 – синий спектральный канал; B4 – красный спектральный канал; B6 – видимый и ближний инфракрасный канал.

На основе полученных значений индекса PSRI была проведена классификация территории с определением площадей лесных участков разных категорий состояния.

Биофизические показатели были рассчитаны с использованием программы SNAP 9, включающей инструмент «Биофизический процессор», разработанный Европейским космическим агентством (ESA) для оценки физических и биологических параметров растений с использованием данных от Sentinel-2.

Результаты исследования и их обсуждение. В табл. 2 и на рис. 2 показано распределение значений индекса NDVI на исследуемой территории с 2013 по 2022 год. Значения индекса в 2013 году достигали максимального значения 0,7, минимального – 0,25 и среднего – 0,30, стандартное отклонение от среднего значения составило 0,079. Это свидетельствует об однородном распределении значений индекса растительности. В 2022 году среднее значение вегетационного индекса увеличилось до 0,34 при стандартном отклонении от среднего значения 0,078, что свидетельствует о незначительном общем улучшении состояния растительного покрова за указанный период.

Таблица 2

Значения вегетационного индекса NDVI в 2013 и 2022 году

NDVI values in 2013 and 2022

Год	Минимум	Максимум	Среднее значение	Среднее квадратичное отклонение
2013	–0,25	0,70	0,31	0,080
2022	–0,24	0,60	0,34	0,078

Была определена доля изменений вегетационного индекса за учетный период (табл. 3, рис. 3). Практически без изменения остались водные поверхности (класс 1). Непригодные для ведения лесного хозяйства площади земель уменьшились незначительно – на 1,1% (класс 2).

Значительные снижения индекса (14,29%) отмечены для площадей класса 3, представляющих насаждения средней продуктивности и качественного состояния, а площади, представляющие насаждения повышенной продуктивности, увеличились на 15,49%. Это можно объяснить улучшенным ростом насаждений вторичных генераций, сформировавшихся на вырубках к 2022 году, и снижением доли перестойных насаждений.

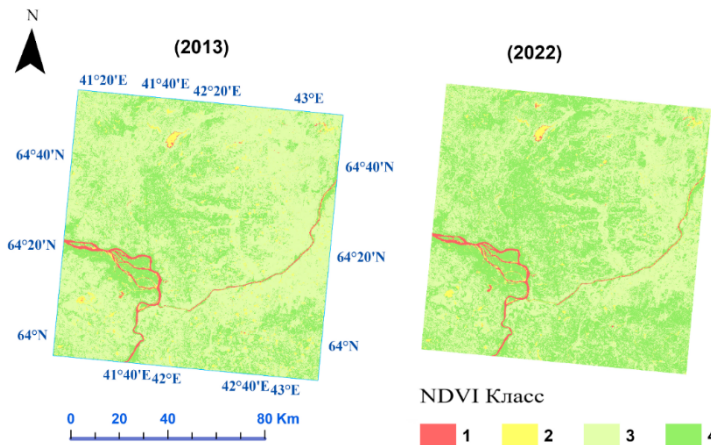


Рис. 2. Распределение значений вегетационного индекса NDVI в течение периода исследования в соответствии с классификацией (данные спутника Landsat 8)

Fig. 2. Distribution of NDVI values during the study period according to classification (Landsat 8 satellite data)

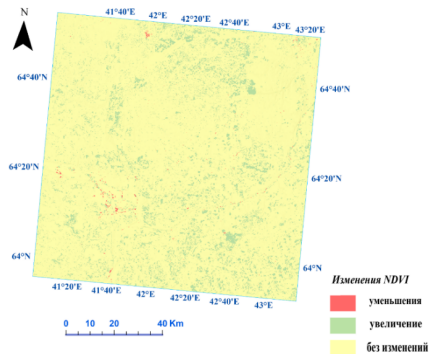


Рис. 3. Динамика вегетационного индекса NDVI

Fig. 3. Dynamics of vegetation index NDVI

Таблица 3

Изменения индекса с 2013 по 2022 год, %
Index changes from 2013 to 2022, %

Год	Класс 1	Класс 2	Класс 3	Класс 4
2022	1,27	2,1	54,66	41,97
2013	1,35	3,22	68,95	26,48
Изменения	-0,08	-1,12	-14,29	15,49

Индекс отражения старения растений (PSRI)

На рис. 4 показаны значения индекса PSRI, которые в основном близки к нулю и имеют отрицательные значения (обозначены зеленым цветом). Это говорит о хорошем качественном состоянии насаждений. На небольшой части территории индекс достигает 0,1 (обозначено желтым цветом), что указывает на переходный или средний уровень состояния. Эти значения могут быть ранними признаками деградации растений или негативного воздействия. На участках, занимающих примерно 5% от общей площади, индекс принимает положительные значения, превышающие 0,2, что указывает на физиологический стресс и снижение фотосинтеза. С течением времени это может привести к частичному или полному высыханию насаждений.

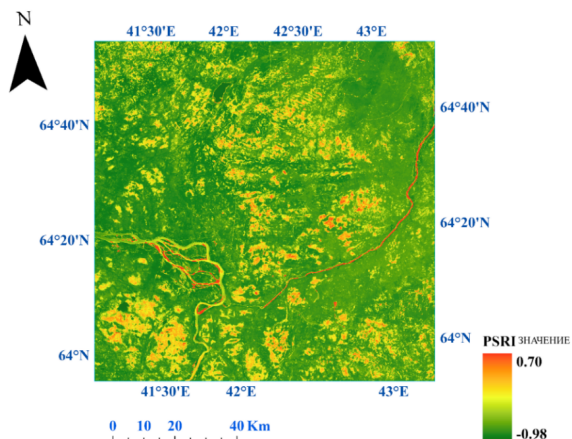


Рис. 4. Индекс отражения старения растений (PSRI) за 2022 год

Fig. 4. Senescence Reflectance Index (PSRI) for 2022

Биофизические показатели

Результаты анализа биофизических индексов (табл. 4, рис. 5–7) показали, что лесные насаждения в районе исследования находятся в среднем качественном состоянии. Средние значения биофизических индексов находятся на низком уровне. Индекс площади листовой поверхности (LAI) достиг наивысшего значения 7,4, но на небольшой площади. В основном встречаются насаждения со средним значением индекса 1,87 и стандартным отклонением 0,53. Варьирование показателя составило 28%.

Индекс содержания хлорофилла в листьях (ССС), который достиг наивысшего значения 537 при среднем содержании хлорофилла в листьях 88,61 со стандартным отклонением 38,18, имеет более высокий уровень изменчивости – 43%. Низкое среднее значение индекса указывает на преимущественно слабую концентрацию хлорофилла и снижающуюся эффективность фотосинтеза растительного покрова, что также подтвердил индекс старения растительности. Такой результат может быть следствием широкого распространения спелых и перестойных древостоев, составляющих 60–80% от покрытой лесом площади в разных частях района исследований.

Таблица 4

Значения биофизических индексов в 2022 году

Biophysical indices values for 2022

Индекс	Минимум	Максимум	Среднее	STD
LAI	0	7,46	1,87	0,53
CCC	0	537,00	88,61	38,18
FCover	0	1,00	0,54	0,14

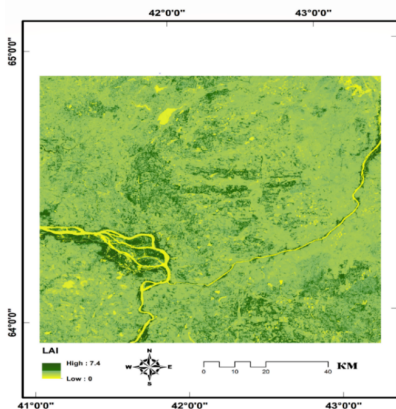


Рис. 5. Значения индекса LAI за 2022 год

Fig. 5. LAI index values for 2022

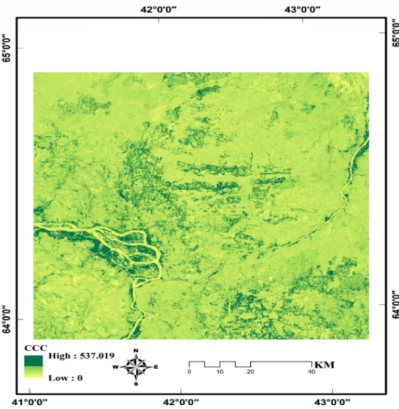


Рис. 6. Значения индекса CCC за 2022 год

Fig. 6. CCC index values for 2022

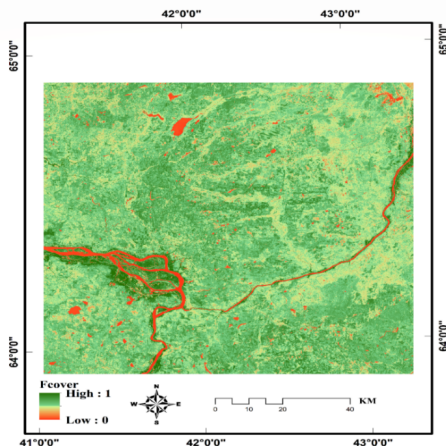


Рис. 7. Значения индекса FCover за 2022 год

Fig. 7. FCover index values for 2022

Индекс FCover показал приемлемые результаты, где максимальное значение достигло 1, но также на ограниченных площадях, в то время как среднее значение составило 0,54 со стандартным отклонением 0,14. Это соответствует также индексу растительности, который был оценен с использованием спутника Landsat 8. Это подтверждает важность и возможность использования этого показателя для анализа изменений в растительности.

Выводы. Результаты применения вегетационных индексов выявили некоторую тенденцию улучшения состояния растительного покрова в районе исследований. Анализ значений NDVI показал повышение доли покрытой лесом площади с 2013 по 2022 год, о чем говорит повышение среднего значения NDVI, что свидетельствует о положительных изменениях в экологической обстановке исследуемой территории.

Значительное увеличение лесных площадей, характеризующихся повышенной продуктивностью, и снижение площадей с ухудшенным качественным состоянием может указывать на эффективность применяемых методов управления лесами, своевременное проведение системы рубок ухода и лесовосстановления.

Отмечено наличие физиологического стресса у части насаждений, о чем свидетельствуют значения индекса старения растительности и индекса хлорофилла. Полученные результаты подтверждают необходимость даль-

нейшего изучения факторов, способствующих повышению качественного состояния насаждений и эффективности фотосинтеза в северотаежном районе и на сухопутной территории Арктики.

В исследовании подчеркивается важность применения методов дистанционного зондирования для крупномасштабного мониторинга и оценки изменений растительности на больших и отдаленных территориях северотаежного района сухопутной территории Арктики.

Необходимы дальнейшие исследования для изучения фундаментальных факторов динамики растительного покрова Севера, включая изменение климата, методы лесопользования, антропогенное воздействие, для обоснования стратегий устойчивого управления лесными ресурсами.

Сведения о финансировании исследования. Публикация подготовлена по результатам НИР, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований в сфере деятельности Федерального агентства лесного хозяйства (регистрационный номер темы 123022800118-4).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алиаби А. Анализ динамики состояния лесов с использованием данных дистанционного зондирования Земли и ГИС-технологий: магистерская диссертация. Томск: Томский политехнический университет, 2017. 122 с.

Барталев С.А., Еришов Д.В., Исаев А.С., Лупян Е.А. Основные задачи и перспективы создания системы глобального спутникового мониторинга лесов // Лесоведение. 2011. № 6. С. 3–15.

Денисова А.Ю., Егорова А.А., Сергеев В.В. Обнаружение изменений границ лесных насаждений по данным ДЗЗ // «Информационные технологии и нанотехнологии» (ИТНТ-2020): сб. тр. по материалам VI Междунар. конф. и молодеж. шк. Самара, 2020. Т. 2. С. 15–28.

Никитина Н.А. Обзор современных методов исследования лесного покрова по данным дистанционного зондирования // Интерэкспо Гео-Сибирь: XIV Межд. науч. конгресс. Новосибирск, 2018. Т. 2. С. 174–177.

Сутырина Е.Н. Дистанционное зондирование Земли: учеб. пособие. Иркутск: ИГУ, 2013. 165 с.

Учебно-методическая документация: Мониторинг лесохозяйственной деятельности. Тюмень: ТГУ, 2015. 138 с.

Al-Mousawi I.M.H. Detection of Temporal Changes in Al-Diwaniyah Governorate Using Image Differencing Method for the Period from 2001 to 2006 // Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences. 2014. Vol. 22, iss. 4. P. 1388–1401. (In Arab.)

Al-Ruhayli B. Functional Equivalence among Spectral Vegetation Indices in Estimating Vegetation Cover from Satellite Data in the Al-Hada and Al-Shafa Regions North of the Sarat Mountains // *Egyptian Journal of Environmental Change*. 2013. Vol. 5, no. 5. P. 79–104. (In Arab.)

Fassnacht F., White J., Wulder M., Næsset E. Remote Sensing in Forestry: current challenges, considerations and directions // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2024. Vol. 97, iss. 1. P. 11–37. DOI: 10.1093/forestry/cpad024.

Gandhi G.M., Parthiban S., Thummalu N., Christy A. Ndvi: Vegetation change detection using remote sensing and Gis – A case study of Vellore District // *Procedia Computer Science*. 2015. Vol. 57: 3rd International Conference on Recent Trends in Computing 2015 (ICRTC-2015) (special issue). P. 1199–1210. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.415.

Gao Y., Quevedo A., Loya J. Forest Disturbance Detection by Landsat-Based NDVI Time Series for Ayuquila River Basin, Jalisco, Mexico // *Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)*. Santiago, 2020. P. 82–86. DOI: 10.1109/LAGIRS48042.2020.9165583.

García-Álvarez D., Lara Hinojosa J. Global Thematic Land Use Cover Datasets Characterizing Vegetation Covers // *Land Use Cover Datasets and Validation Tools: Validation Practices with QGIS*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7>.

Gromtsev A. Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia // *Silva Fennica*. 2002. Vol. 36, no. 1. P. 41–55.

Gupta S.K., Pandey A.Ch. Spectral aspects for monitoring forest health in extreme season using multispectral imagery // *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2021. Vol. 24, iss. 3 (part 2). P. 579–586. DOI: 10.1016/j.ejrs.2021.07.001

Khorrami B., Kamran K.V. A fuzzy multi-criteria decision-making approach for the assessment of forest health applying hyperspectral imageries: A case study from Ramsar forest, North of Iran // *International Journal of Engineering and Geosciences*. 2022. Vol. 7. Iss. 3. P. 214–220.

Meneses-Tovar C.L. Analysis of the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) for the Detection of Degradation of Forest Cover in Mexico 2008 – 2009 // *Forest Resources Assessment Programme*. Rome, 2009. 29 p.

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Products by Using OCM2-GAC Sensor Data. SDAPSA; National Remote Sensing Centre, 2014. 4 p.

Powell B., Ickowitz A., McMullin S., Jamnadass R., Padoch Ch., Pinedo-Vasquez M., Sunderland T. The Role of Forests, Trees and Wild Biodiversity for Nutrition-Sensitive Food Systems and Landscapes. FAO; WHO, 2013. 25 p.

Reis S. Analyzing Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS in Rize, North-East Turkey // *Sensors*. 2008. Vol. 8, iss. 10. P. 6188–6202. DOI: 10.3390/s8106188.

Rouse J.W., Hass R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt (MD), 1974. 390 p.

Russian forests and climate change. What Science Can Tell Us 11. European Forest Institute, 2020. 136 p.

Study of Modern Technologies Applied in Advanced Countries in the Field of Conservation and Development of Forest Wealth. Khartoum: Arab Organisation for Agricultural Development, 1998. 147 p. (In Arab.)

Treitz P., Howarth Ph. Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems // Progress in Physical Geography: Earth and Environment. 1999. Vol. 23, iss. 3. P. 359–390.

Tripathi P. Remote sensing indices and their applications // Training of Trainers on the applications of remote sensing and GIS for Afghanistan. 2020. 46 p.

Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER. Version 1.1. National Institute of Agronomic Research, 2016. 53 p.

Xie Q., Dash J., Huete A., Jiang A., Yin G., Ding Ya., Peng D., Hall C. C., Brown L., Shi Yu., Ye H., Dong Yi., Huang W. Retrieval of crop biophysical parameters from Sentinel-2 remote sensing imagery // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. 2019. Vol. 80. P. 187–195.

References

Al-Mousawi I. M. H. Detection of Temporal Changes in Al-Diwaniyah Governorate Using Image Differencing Method for the Period from 2001 to 2006. *Journal of University of Babylon for Pure and Applied Sciences*, 2014, vol. 22, iss. 4, pp. 1388–1401. (In Arab.)

Al-Ruhayli B. Functional Equivalence among Spectral Vegetation Indices in Estimating Vegetation Cover from Satellite Data in the Al-Hada and Al-Shafa Regions North of the Sarat Mountains. *Egyptian Journal of Environmental Change*, 2013, vol. 5, no. 5, pp. 79–104. (In Arab.)

Alshaibi A. Analysis of the dynamics of forests using Earth remote sensing data and GIS technologies: Master's thesis. Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2017. 122 p. (In Russ.)

Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Lupyan E. A. Main tasks and prospects for creating a system of global satellite monitoring of forests. *Lesovedenie*, 2011, no. 6, pp. 3–15. (In Russ.)

Denisova A.Yu., Egorova A.A., Sergeev V.V. Detection of changes in the boundaries of forest plantations according to remote sensing data. «*Information Technologies and Nanotechnologies*» (ITNT-2020): mater. of VI Intern. conf. and youth school. Samara, 2020. T. 2. P. 15–28. (In Russ.)

Educational and methodological documentation: Monitoring forestry activities. Tyumen: TSU, 2015. 138 p. (In Russ.)

Fassnacht F., White J., Wulder M., Næsset E. Remote Sensing in Forestry: current challenges, considerations and directions. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2024, vol. 97, iss. 1, pp. 11–37. DOI: 10.1093/forestry/cpad024.

Gandhi G.M., Parthiban S., Thummalu N., Christy A. Ndzi: Vegetation change detection using remote sensing and Gis – A case study of Vellore District. *Procedia Computer Science*, 2015, vol. 57: 3rd International Conference on Recent Trends in Computing 2015 (ICRTC-2015) (special issue), pp. 1199–1210. DOI: 10.1016/j.procs.2015.07.415.

Gao Y., Quevedo A., Loya J. Forest Disturbance Detection by Landsat-Based NDVI Time Series for Ayuquila River Basin, Jalisco, Mexico. *Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)*. Santiago, 2020. P. 82–86. DOI: 10.1109/LAGIRS48042.2020.9165583.

García-Álvarez D., Lara Hinojosa J. Global Thematic Land Use Cover Datasets Characterizing Vegetation Covers. *Land Use Cover Datasets and Validation Tools: Validation Practices with QGIS*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1007/978-3-030-90998-7>.

Gromtsev A. Natural disturbance dynamics in the boreal forests of European Russia: a review. *Silva Fennica*, 2002, vol. 36, no. 1, pp. 41–55.

Gupta S.K., Pandey A.Ch. Spectral aspects for monitoring forest health in extreme season using multispectral imagery. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2021, vol. 24, iss. 3 (part 2), pp. 579–586. DOI: 10.1016/j.ejrs.2021.07.001

Khorrami B., Kamran K.V. A fuzzy multi-criteria decision-making approach for the assessment of forest health applying hyperspectral imageries: A case study from Ramsar forest, North of Iran. *International Journal of Engineering and Geosciences*, 2022, vol. 7, iss. 3, pp. 214–220.

Meneses-Tovar C.L. Analysis of the Normalized Differential Vegetation Index (NDVI) for the Detection of Degradation of Forest Cover in Mexico 2008–2009. *Forest Resources Assessment Programme*. Rome, 2009. 29 p.

Nikitina N. A. Review of modern methods for studying forest cover based on remote sensing data. Interexpo: Geo-Syberia: XIV Int. sci. congress. Novosibirsk, 2018. T. 2. P. 174–177. (In Russ.)

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Products by Using OCM2-GAC Sensor Data. SDAPSA; National Remote Sensing Centre, 2014. 4 p.

Powell B., Ickowitz A., McMullin S., Jamnadass R., Padoch Ch., Pinedo-Vasquez M., Sunderland T. The Role of Forests, Trees and Wild Biodiversity for Nutrition-Sensitive Food Systems and Landscapes. FAO; WHO, 2013. 25 p.

Reis S. Analyzing Land Use/Land Cover Changes Using Remote Sensing and GIS in Rize, North-East Turkey. *Sensors*, 2008, vol. 8, iss. 10, pp. 6188–6202. DOI: 10.3390/s8106188.

Rouse J.W., Hass R.H., Schell J.A., Deering D.W., Harlan J.C. Monitoring the Vernal Advancement and Retrogradation (Greenwave Effect) of Natural Vegetation. NASA/GSFC Type III Final Report. Greenbelt (MD), 1974. 390 p.

Russian forests and climate change. What Science Can Tell Us 11. European Forest Institute, 2020. 136 p.

Study of Modern Technologies Applied in Advanced Countries in the Field of Conservation and Development of Forest Wealth. Khartoum: Arab Organisation for Agricultural Development, 1998. 147 p. (In Arab.)

Sutyryna E.N. Remote sensing of the Earth. Irkutsk: ISU, 2013. 165 p. (In Russ.)

Treitz P., Howarth Ph. Hyperspectral remote sensing for estimating biophysical parameters of forest ecosystems. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 1999, vol. 23, iss. 3, pp. 359–390.

Tripathi P. Remote sensing indices and their applications. *Training of Trainers on the applications of remote sensing and GIS for Afghanistan*. 2020. 46 p.

Weiss M., Baret F. S2ToolBox Level 2 products: LAI, FAPAR, FCOVER. Version 1.1. National Institute of Agronomic Research, 2016. 53 p.

Xie Q., Dash J., Huete A., Jiang A., Yin G., Ding Ya., Peng D., Hall C. C., Brown L., Shi Yu., Ye H., Dong Yi., Huang W. Retrieval of crop biophysical parameters from Sentinel-2 remote sensing imagery. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2019, vol. 80, pp. 187–195.

Материал поступил в редакцию 25.01.2024

Коптев С.В., Алабдуллахалхасно Х. Оценка состояния и динамики лесов Архангельской области с использованием технологий дистанционного зондирования // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 141–157. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.141-157

Проведена оценка динамики и состояния растительного покрова в северотаежном районе сухопутной территории Арктики Архангельской области с помощью данных дистанционного зондирования Земли и с использованием вегетационных индексов. Результаты анализа индекса NDVI показали улучшение состояния растительного покрова за последние 10 лет. Сравнение значений NDVI в 2013 и 2022 г. показало, что площади насаждений со средними характеристиками сократились на 14,29%, в то время как площади насаждений повышенной продуктивности увеличились на 15,49%. Это увеличение объясняется повышенным ростом насаждений вторичных генераций, формирующихся на месте старовозрастных насаждений, повышением сомкнутости крон и увеличением относительной полноты, что является результатом эффективной реализации лесохозяйственных мероприятий, включая рубки ухода и лесовосстановление. Анализ индекса старения растительного покрова показал значения, близкие к нулю, на площади, составляющей 5% от общей площади исследования, в то время как на большей ее части были обнаружены положительные значения, превышающие 0,2, что указывает на физиологическое напряжение и начало процесса превращения хлорофилла в каротиноиды. Результаты анализа биофизических показателей свидетельствуют,

что растительный покров на исследуемой территории находится в среднем качественном состоянии. Средний индекс листовой поверхности на большей части территории исследования составил 1,87, что указывает на отсутствие высокой густоты растительности. Среднее значение хлорофиллового индекса в листьях составило 88,61, что также является низким значением и свидетельствует о слабом содержании хлорофилла, физиологическом стрессе и низкой интенсивности процесса фотосинтеза.

Ключевые слова: NDVI, биофизические показатели, сухопутная территория Арктики, ДЗЗ, динамика.

Koptev S.V., Alabdullahalkhasno H. Assessment of forest dynamics and condition in the Arkhangelsk region using remote sensing technologies and vegetation indices. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 141–157 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.141-157

Conducted study purposed to assess the dynamics and condition of vegetation cover in North-taiga Arctic region, using the Arkhangelsk region as a case study. This involved processing satellite imagery with the calculation of several vegetation indices. The results of the NDVI analysis for 2013 revealed a maximum value of 0.7 and a minimum of -0.25 , with an average of 0.30. Values were distributed closely around the mean. By 2022, the average vegetation coverage index had increased to 0.34, suggesting an improvement in vegetation coverage over the study points. The percentage changes were calculated by comparing NDVI values over the study years. The results showed a decrease of 14.29% in areas representing moderate vegetation cover, while areas representing good vegetation cover increased by 15.49%. This increase is attributed to tree growth, improved canopy coverage, and increased vegetation density in 2022, which is a result of effective forest management practices, including thinning and reforestation measures. Analysis of the vegetation aging index indicated values close to zero in 5% of the total study area, while positive values exceeding 0.2 were observed over a significant portion of the region. These findings suggest physiological stress, partial chlorophyll degradation, and the initiation of conversion to carotenoids. The results of the analysis of biophysical indicators showed that the vegetation cover in the study area is in the average state. The average leaf area index was 1.87 over most of the study area, indicating the absence of high densities of vegetation. The average value of the chlorophyll index in the leaves was 88.61, which is also a low value and indicates weak chlorophyll content, which indicates physiological stress and low efficiency of the photosynthesis process.

Keywords: NDVI, biophysical indicators, North Taiga region, remote sensing data, dynamic detection.

КОПТЕВ Сергей Викторович – заведующий кафедрой лесоводства и лесоустройства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор сельскохозяйственных наук, доцент; главный научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства. Researcher ID: ABD-5497-2021. ORCID: 0000-0002-5402-1953.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия; 163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: s.koptev@narfu.ru

KOPTEV Sergey V. – DSc (Agriculture), Head of Silviculture and Forest Management Department Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov; Leading Researcher Northern Research Institute of Forestry. Researcher ID: ABD-5497-2021. ORCID: 0000-0002-5402-1953.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia; 163062. Nikitova str. 13. Arkhangelsk. Russia. E-mail: s.koptev@narfu.ru

АЛАБДУЛЛАХАЛХАСНО Хасан – аспирант кафедры лесоводства и лесоустройства Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. ORCID: 0000-0003-0854-550X.

163002, набережная Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: 199213000hfa@gmail.com

ALABDULLAHALKHASNO Hasan – PhD student of the Department of Forestry and Forest Management of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0000-0003-0854-550X.

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: 199213000hfa@gmail.com

**Е.А. Сурина, Н.А. Демидова, С.А. Корчагов, О.А. Конюшатов,
Л.Г. Гоголева**

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОДУКТИВНОСТИ
ЛИСТВЕННО-ХВОЙНЫХ НАСАЖДЕНИЙ
РУБКАМИ УХОДА В ТАЕЖНОЙ ЗОНЕ**

Введение. Наибольшее распространение в таежной зоне имеют лиственно-еловые, елово-лиственные насаждения и смешанные сосняки. Лиственно-еловые насаждения занимают около 31% площади [Чибисов, 2007], среди них преобладает березово-еловая формация. Вопросам формирования и роста таких насаждений уделяли внимание многие исследователи [Кравчинский, 1905; Тарашкевич, Осетров, 1916; Нестеров, 1949; Чибисов и др., 2011; Захаров, 2011, 2012; Минин, 2013], в том числе и авторы настоящей статьи [Корчагов и др., 2023а; Корчагов и др., 2023б; Surina, 2023; Surina et al., 2023].

В условиях таежной зоны имеются свои особенности формирования лиственно-хвойных ценозов. Так, например, густота березового элемента насаждения увеличивается от средней к северной тайге, а в пределах лесорастительных условий – от кисличных-черничных свежих к черничным влажным типам. В 10-летнем возрасте число деревьев березы в условиях черничника влажного в северной подзоне тайги достигает 70, в средней – 50, в черничнике свежем – 45 и 30, кисличнике – 25 и 20 тыс. шт./га соответственно. К 50 годам доля березы составляет 7–10% от общего числа стволов по сравнению с 10-летним возрастом. В средней подзоне тайги лесовосстановление проходит успешнее и быстрее, чем в северной. Максимальное накопление подроста ели в соответствующих лесорастительных условиях отмечается на 5–15 лет раньше по сравнению с северной тайгой. В отличие от березы густота ели уменьшается от черничного свежего и кисличного к черничному влажному типу лесорастительных условий. Исключительную роль в развитии ели играет полог лиственного яруса, который формирует свой микроклимат. Установлено, что береза активно поселяется на рубках средней подзоны тайги в первые 4–6 лет, достигая 30–35 тыс. шт./га. Возобновление ели происходит одновременно с березой, но максимальное ее накопление идет только после формирования благопри-

ятной среды для поселения ели (отсутствие раннеосенних и поздневесенних заморозков, создание оптимальных почвенных условий). В 20–25-летних насаждениях под пологом березы имеется максимальное количество подроста ели [Чибисов, Нефедова, 2007; Чибисов и др., 2011].

Цель работы заключалась в определении лесоводственной эффективности трехприемных рубок ухода в лиственно-хвойных насаждениях, формирующихся в условиях таежной зоны.

Материалы и методика исследований. Для проведения длительных научных исследований сотрудниками Архангельского института леса и лесохимии (ныне ФБУ «СевНИИЛХ») в 1966 г. на территории таежной зоны (Архангельская область, Обозерское лесничество, Северное участковое лесничество, кв. 23) были заложены постоянные пробные площади, одна из которых являлась контрольным вариантом (ППП 1К), вторая – опытным вариантом (ППП 2РУ) с проведенными в трехкратной повторности классическими (прочистки, прореживания, проходные рубки) рубками ухода (в возрасте ели 20, 28 и 40 лет). Закладка пробных площадей и расчет таксационных показателей выполнялись по общеизвестным методикам^{1,2} [Третьяков и др., 1965].

В ходе первого разреживания равномерно по площади вырубались ель (65% по числу стволов), береза (80%) и сосна (60%), при втором разреживании – 80, 65 и 50% стволов (от числа сохранившихся после первого приема деревьев) соответственно, при третьем разреживании – 15, 60 и 70% стволов (от числа сохранившихся после второго приема деревьев) соответственно.

Динамические наблюдения за формированием древостоев на участках выполнены сотрудниками института в годы проведения рубок ухода, а также в возрасте древостоя 55, 64 и 74 года.

Результаты исследования и обсуждение. Таксационные показатели насаждений в годы проведения лесоучетных работ в разрезе вариантов представлены в табл. 1. В момент закладки опыта на контрольном и опытных участках произрастали ель европейская, береза пушистая и сосна обыкновенная, количество которых существенно не различалось по вариантам и составляло 59,3 тыс. шт./га. Тип лесорастительных условий – черничный.

¹ ГОСТ 16128–70. Площади пробные лесоустроительные. Методы закладки. М.: Издательство стандартов, 1971. 23 с.

² ОСТ 56-69-83. Площади пробные лесоустроительные. Метод закладки. М.: ЦБМТлесхоз, 1984. 10 с.

Таблица 1

**Динамика основных таксационных показателей древостоев
на пробных площадях**

Dynamics of main taxation indices of stands at sample areas

Пробная площадь	Показатели	Порода	Возраст елового элемента, лет					
			Год учета					
			<u>20</u> 1966	<u>28</u> 1974	<u>40</u> 1986	<u>55</u> 2001	<u>64</u> 2010	<u>74</u> 2020
1К контроль	Число стволов, шт./га	С	1580	1500	640	280	127	143
		Б	15630	13300	5640	3360	1198	900
		Е	42100	39800	10600	7080	1156	964
	Средний диаметр, см	С	4,1	6,2	8,9	12,6	16,8	18,2
		Б	3,0	4,0	7,6	10,7	12,6	14,2
		Е	2,0	0,7	2,9	3,4	8,4	9,0
	Средняя высота, м	С	5,0	10,0	14,0	16,7	17,0	18,0
		Б	5,9	8,0	16,2	17,7	16,7	15,5
		Е	1,1	1,5	2,8	2,9	8,4	7,5
	Запас, м ³ /га	С	10,1	25,1	28,2	25,4	20,0	37,2
		Б	36,2	78,5	209,2	257,3	114,5	117,5
		Е	0,9	4,1	21,6	5,2	30,4	31,4
2РУ	Число стволов, шт./га	С	1570	610	283	83	206	144
		Б	15560	2720	917	350	391	289
		Е	42120	14582	2950	2423	2657	1814
	Средний диаметр, см	С	4,0	6,8	13,0	21,2	25,9	26,4
		Б	3,0	6,7	12,3	18,7	21,0	22,4
		Е	2,1	1,1	5,7	9,5	11,1	11,7
	Средняя высота, м	С	5,0	9,5	12,5	20,0	22,0	21,0
		Б	5,9	9,5	14,3	12,3	21,2	21,3
		Е	1,2	2,1	5,6	9,5	13,8	12,0
	Запас, м ³ /га	С	10,4	9,6	26,4	28,0	112,0	116,0
		Б	36,5	35,8	76,2	85,0	126,0	119,0
		Е	1,1	6,1	30,5	94,0	184,0	127,0

Примечание. В 1966 г. диаметры стволов замерены у корневой шейки.

Длительные наблюдения показывают постепенное уменьшение густоты древостоя на контрольном участке при сохранении преобладания ели по числу стволов (рис. 1). С течением времени число стволов ели и березы существенно снижалось в процессе естественного изреживания, в 64-летнем возрасте древостоя количество экземпляров ели и березы относительно выровнялось и приблизилось к количеству стволов сосны. К 74 годам общее количество деревьев на контрольном участке достигало около 2,0 тыс. шт./га, в том числе ель – 1,0, береза – 0,9, сосна – 0,1 тыс. шт./га. Доля хвойных пород в составе древостоя составляла около 50% от общего числа стволов на участке.

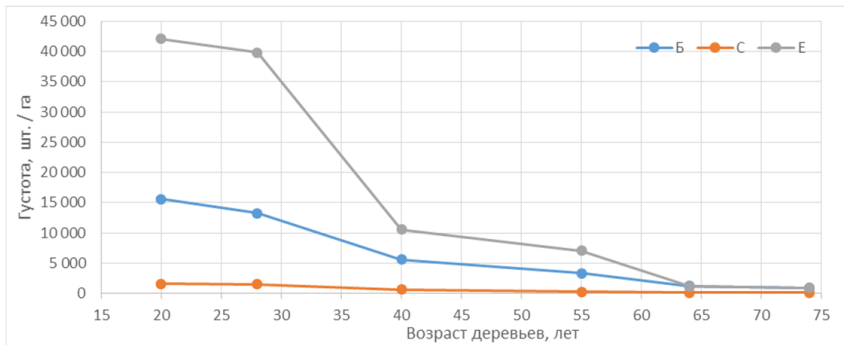


Рис. 1. Динамика густоты древостоя на ППП 1К
Fig. 1. Dynamics of density of forest stand in 1K sample plot

В опытном варианте прослеживаются результаты проведенных разреживаний, после рубок ухода наблюдалось закономерное снижение густоты древостоя (рис. 2). К 74-летнему возрасту на секции с трехприемными рубками ухода общее число стволов составляло около 2,2 тыс. шт./га, в том числе ель – 1,8, береза – 0,3, сосна – 0,1 тыс. шт./га. Проведенными рубками ухода удалось сформировать древостой с преобладанием хвойных пород в составе (около 90% по числу стволов), что соответствует целям проведения рубок ухода.

На контрольном участке по всем древесным породам наблюдалось постепенное увеличение диаметра стволов на протяжении всего срока исследования (рис. 3).

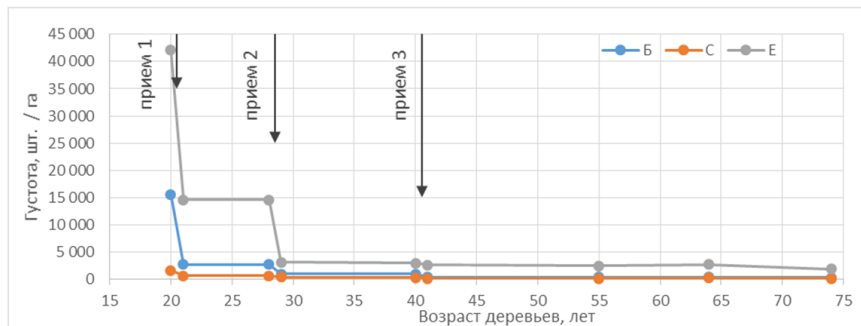


Рис. 2. Динамика густоты древостоя на ППП 2РУ

Fig. 2. Dynamics of density of forest stand in 2RU sample plot

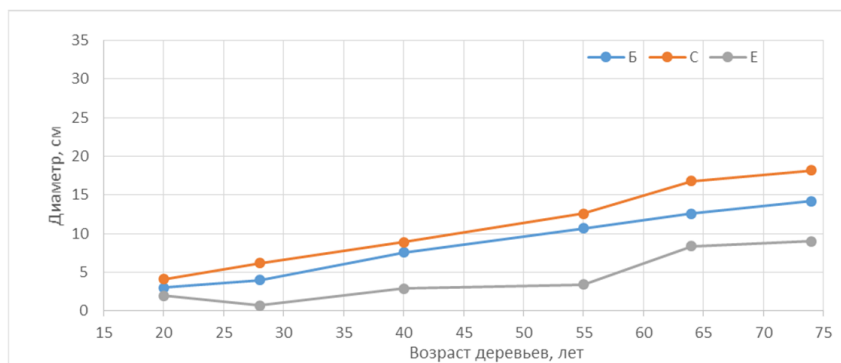


Рис. 3. Динамика среднего диаметра стволов на ППП 1К

Fig. 3. Dynamics of average diameter in the 1K sample plot

На контрольной секции годичный прирост по диаметру стволов на высоте 1,3 м в среднем за весь период наблюдений составил для ели – 0,12, для березы – 0,17, для сосны – 0,24 см.

В опытной секции у всех древесных пород в течение первых лет после проведения первого приема рубок ухода отмечалось существенное увеличение диаметра стволов. Второе разреживание существенно отразилось на среднем диаметре ели и сосны, третье разреживание – на среднем диаметре сосны и березы, что также особенно проявилось в первые годы после ухода. Проведение рубок ухода позволило увеличить среднегодовой прирост по диаметру стволов для ели – до 0,17, для березы – до 0,36, для сосны – до 0,41 см, что отвечает целям проведения рубок ухода.

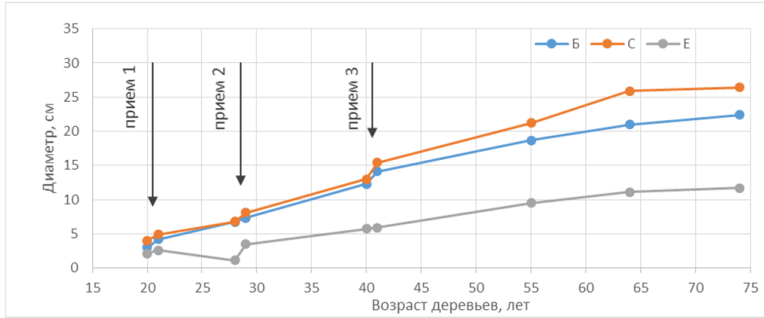


Рис. 4. Динамика среднего диаметра стволов на ППП 2РУ

Fig. 4. Dynamics of average diameter in the 2RU sample plot

На контрольном участке на протяжении всего периода исследований сосна и береза существенно превышали ель по средней высоте стволов (рис. 5).

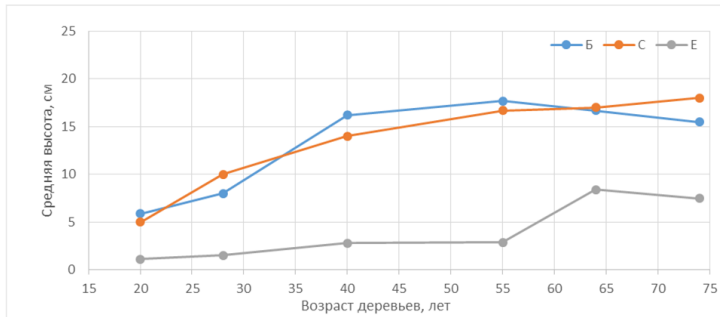


Рис. 5. Динамика средней высоты на ППП 1К

Fig. 5. Dynamics of average height in 1K sample plot

Еловый компонент, развивающийся под пологом сосны и березы, продолжительный период имел низкую среднюю высоту. С 55-летнего возраста высота ели существенно увеличилась, что может быть связано с отпадом березового элемента и, тем самым, снижением ее угнетающего воздействия.

В отличие от диаметра стволов, существенного увеличения прироста по высоте в первые годы после проведения рубок ухода для всех древесных пород не наблюдалось (рис. 6). Однако в целом за весь период исследований на участке с рубками ухода средняя высота для сосны – в 1,2, для

березы – в 1,4, для ели – в 1,6 раза больше, чем на контроле для соответствующих древесных пород. Таким образом, проведение трехприемных рубок ухода в целом позволило получить дополнительный прирост по высоте ствола.

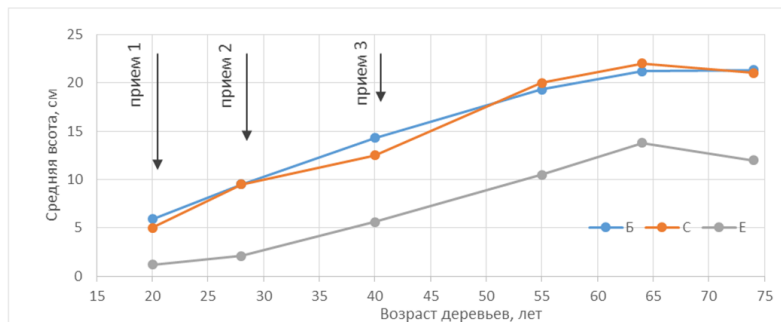


Рис. 6. Динамика средней высоты на ППП 2РУ
Fig. 6. Dynamics of average height in 2RU sample plot

На всем протяжении периода наблюдений на обоих участках выражена ярусность древостоев. Средняя высота березы и сосны превышает среднюю высоту ели в 1,5–2,0 раза.

Наибольший запас древесины на контрольном участке характерен для березового элемента, существенное его накопление наблюдалось до 55-летнего возраста древостоя, когда его величина достигла 257 м³/га (рис. 7). Запас соснового элемента в этом возрасте достиг лишь 25, елового – 5 м³/га.

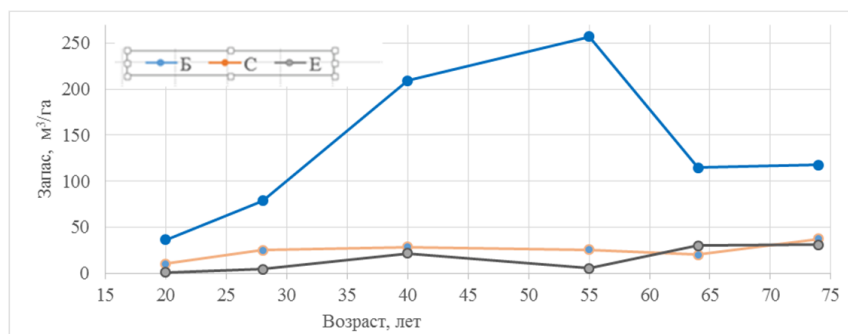


Рис. 7. Динамика запаса древостоя на ППП 1К
Fig. 7. Stock dynamic in 1K sample plot

Общий запас стволовой древесины на контроле за весь период наблюдений увеличился с 47 до 186 м³/га, то есть в 4,0 раза, при этом среднегодовой прирост по запасу составил для ели – 0,5, для березы – 1,5, для сосны – 0,6 м³/га. В составе древостоя на контроле в последний год наблюдений (74 года) в смешанном древостое преобладала береза (63% по запасу).

Проведение трех приемов разреживания древостоя сказалось на изменении запаса стволовой древесины. В первые годы после рубки отмечалось закономерное снижение запаса вследствие вырубки, в последующие годы – его постепенное накопление (рис. 8).

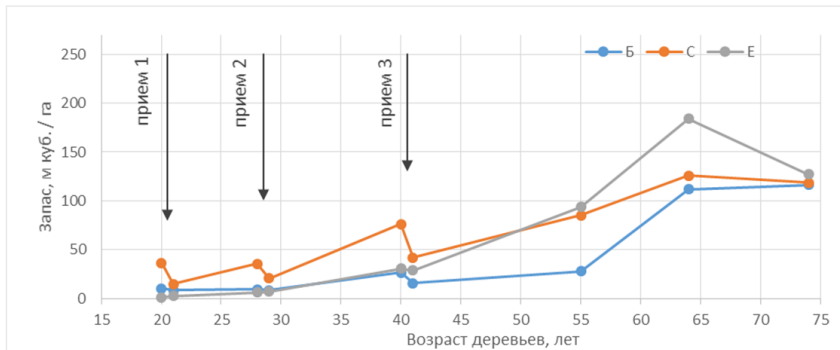


Рис. 8. Динамика запаса древостоя на ППП 2РУ

Fig. 8. Stock dynamic in 2RU sample area

В конечном итоге за весь период наблюдений на опытном участке общий запас древесины увеличился с 48 до 362 м³/га, то есть в 7,5 раз. Среднегодовой прирост по запасу составил для ели – 2,3, для березы – 1,5, для сосны – 2,0 м³/га. Проведением классических видов рубок ухода удалось сформировать хвойно-лиственное насаждение, где доля хвойных пород по запасу составила 67%, что соответствует целям проведения рубок ухода.

Заключение. Проведение трехприемных рубок ухода в лиственно-хвойных насаждениях, произрастающих в условиях таежной зоны Европейского Севера России, дало положительный лесоводственный эффект. В результате проводимых рубок ухода увеличился среднегодовой прирост по диаметру, высоте стволов и запасу стволовой древесины. Рубками ухода к 74-летнему возрасту насаждений удалось из лиственно-хвойного сформировать хвойно-лиственный древостой, где общий запас хвойной древесины составляет 67%.

Таким образом, посредством своевременного и качественного проведения классических рубок ухода возможно повысить продуктивность насаждений и сформировать древостой с преобладанием хвойного элемента.

Вклад авторов. Все авторы в равной доле участвовали в написании статьи.

Сведения о финансировании исследования. Работа подготовлена по результатам исследований, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований (рег. № 123032700030-9); тема 4-И23 рубки «Повышение эффективности использования лесов Арктической зоны Европейской части Российской Федерации с помощью оптимизации рубок при заготовке древесины».

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Захаров А.Ю. Влияние рубок ухода на рост сосны и ели в смешанных сосняках // Сборник трудов ФГУ «СевНИИЛХ» по итогам научно-исследовательских работ за 2005–2009 гг, Архангельск, 2011. С. 50–55.

Захаров А.Ю. О закономерностях роста сосны по диаметру при рубках ухода // Актуальные проблемы биологии и экологии: материалы XVIII Всероссийской молодежной научной конференции. Сыктывкар, 2011. С. 164–165.

Захаров А.Ю. Результаты трехприемных рубок ухода в смешанных сосняках со вторым ярусом ели // ИВУЗ. Лесной журнал. 2012. № 5. С. 52–59.

Корчагов С.А., Гоголева Л.Г., Сурина Е.А., Минин Н.С., Конюшатов О.А. Опыт проведения комплексных рубок в Вологодской области // Актуальные вопросы таежного и притундрового лесоводства на Европейском Севере России: материалы научно-практической конференции. М.: Т8 Издательские Технологии, 2023а. С. 49–55.

Корчагов С.А., Минин Н.С., Сурина Е.А., Гоголева Л.Г. Воспроизводство хвойных древостоев комплексными рубками // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023б. Вып. 246. С. 152–161.

Кравчинский Д.М. По вопросу хозяйства в еловых и лиственных лесах северной и средней России // Лесной журнал. 1905. № 3. С. 373–377.

Минин Н.С. Рост сосняков искусственного происхождения под влиянием рубок ухода // Ученые записки Петрозаводского государственного университета. 2013. № 6 (135). С. 60–64.

Нестеров В.Г. Общее лесоводство: учебник для лесотехн. и лесохоз. вузов. М.–Л.: Гослесбумиздат, 1949. 660 с.

Тарашкевич А.И., Осетров Е.С. К вопросу о развитии и росте елово-лиственных насаждений // Труды по лесному опытному делу в России / Санкт-Петербург: Типография М.А. Александрова. 1916. Вып. 59. 154 с.

Третьяков Н.В., Горский П.В., Самойлович Г.Г. Справочник таксатора. М.: Лесн. пром-сть, 1965. 459 с.

Чибисов Г.А., Гуцин В.А., Фомин А.П., Захаров А.Ю. Лесоводственная и экономическая эффективность рубок ухода: практ. пособие. 2-е изд., испр. и доп. Архангельск: Изд-во С(А)ФУ, 2011. 108 с.

Чибисов Г.А., Неведова А.И. Рубки ухода и фитоклимат: монография; М-во природных ресурсов Российской Федерации, Северный науч.-исслед. ин-т лесного хоз-ва. Архангельск: Северный науч.-исслед. ин-т лесного хоз-ва, 2007. 265 с.

Surina E.A., Korchagov S.A., Minin N.S., Gogoleva L.G., Makarov S.S. On the issue of logging in the taiga zone // III International Conference on Improving Energy Efficiency, Environmental Safety and Sustainable Development in Agriculture (EESTE2023). E3S Web of Conferences, 2023. Vol. 463. No. 02018. 5 p.

Surina E.A. About thinning in the Arkhangelsk region // VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023) / E3S Web of Conferences. 2023. Vol. 411. No. 02040. 7 p.

References

Chibisov G.A., Gushchin V.A., Fomin A.P., Zakharov A. Yu. Lesovodstvennaya i ekonomicheskaya effektivnost' rubok ukhoda [Forestry and economic efficiency of felling]: practic book. 2nd ed. Arkhangelsk: Publishing Narfu, 2011. 108 p (In Russ.)

Chibisov G.A., Nefedova A.I. Rubki ukhoda i fitoklimat [Thinning and phytoclimate]: monography; Ministry of Natural Resources of the Russian Federation, Northern Scientific Research. Institute of Forestry. Arkhangelsk: Northern Research Institute of Forestry, 2007. 265 p. (In Russ.)

Korchagov S.A., Minin N.S., Surina E.A., Gogoleva L.G. Vosproizvodstvo khvoynykh drevostoyev kompleksnymi rubkami [Reproduction of coniferous stands by complex logging]. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj lesotekhnicheskoy akademii*, 2023b, iss. 246, pp. 152–161. (In Russ.)

Korchagov S.A., Gogoleva L.G., Surina E.A., Minin N.S., Konyushatov O.A. Opyt provedeniya kompleksnykh rubok v Vologodskoy oblasti [Experience in complex logging in the Vologda region]. *Actual issues of taiga and tundra forestry in the European North of Russia*: materials of the scientific and practical conference. M.: Publishing Technologies, 2023a, pp. 49–55. (In Russ.)

Kravchinsky D.M. Po voprosu khozyaystva v yelovykh i listvennykh lesakh severnoy i sredney Rossii [On the issue of farming in spruce and deciduous forests of northern and central Russia]. *Forest journal*, 1905, vol. 3, pp. 373–377. (In Russ.)

Minin N.S. Rost sosnyakov iskusstvennogo proiskhozhdeniya pod vliyaniyem rubok ukhoda. [Growth of pine trees of artificial origin under the influence of felling care]. *Scientific notes of Petrozavodsk State University*, 2013, vol. 6 (135), pp. 60–64. (In Russ.)

Nesterov V.G. Obshcheye lesovodstvo [General Forestry Training]. For forestry and forest hunting universities. M.–L.: Goslesbumizdat, 1949. (In Russ.)

Surina E.A. About thinning in the Arkhangelsk region. *VI International Conference on Actual Problems of the Energy Complex and Environmental Protection (APEC-VI-2023)*. E3S Web of Conference, 2023, vol. 411, no. 02040. 7 p. DOI: 10.1051/e3sconf/202341102040.

Surina E.A., Minin N.S. Efficiency of felling in deciduous and spruce plantations in the Northern subzone of the European part of Russia. *News of higher educational institutions. Forest Journal*, 2023, vol. 5 (395), pp. 103–114. DOI: 10.37482/0536-1036-2023-5-103-114.

Tarashkevich A.I., Osetrov E.S.. On the issue of development and growth of spruce-deciduous plantations, *Trudy po opytному lesnomu delu v Rossii [Works on experimental forestry in Russia]*. St. Petersburg: M.A. Aleksandrov printing house, 1916, iss. 59. 154 p. (In Russ.)

Tretyakov N.V., Gorsky P.V., Samoilovich G.G. Taxator's handbook. M.: Forest industry, 1965. 459 p.

Zakharov A.Yu. O zakonomernostyakh sosny po diametru pri rubkakh ukhoda [On the patterns of pine in diameter during felling]. *Actual problems of biology and ecology: materials of the reports of the XVIII All-Russian Youth Scientific Conference*. Syktyvkar, 2011, pp. 164–165. (In Russ.)

Zakharov A.Yu. Rezul'taty trekhpriemnykh rubok ukhoda v smeshannykh sosnyakakh so vtorym yarusov yeli [Results of three-way felling of care in mixed pine forests with the second tier of spruce]. *IVUZ. Forest Journal*, 2012, vol. 5, pp. 52–59. (In Russ.)

Zakharov A.Yu. Vliyaniye rubok ukhoda na rost sosny i yeli v smeshannykh sosnyakakh [Impact of felling on the growth of pine and spruce in mixed pine trees]. *Collection of works of FGU «SevNIILH» based on the results of research work for 2005–2009*. Arkhangelsk, 2011, pp. 50–55. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.07.2024

Сурина Е.А., Демидова Н.А., Корчагов С.А., Конюшатов О.А., Гоголева Л.Г. Повышение продуктивности лиственно-хвойных насаждений рубками ухода в таежной зоне // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 158–171. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.158-171

Лиственно-хвойные насаждения занимают значительную площадь среди лесов таежной зоны. Формирование на таких участках ценных хвойных древостоев является основополагающей целью ведения лесного хозяйства. Один из возможных путей достижения этой цели – своевременное и качественное проведение рубок ухода на различных этапах формирования насаждений. Цель исследования заключалась в определении лесоводственной эффективности трехприемных рубок ухода в лиственно-хвойных насаждениях, формирующихся в

условиях таежной зоны. Длительные научные исследования проводятся с 1966 г. на постоянных пробных площадях, одна из которых является контрольным вариантом, а вторая – опытным вариантом с проведенными рубками ухода в возрасте ели 20, 28 и 40 лет. В ходе первого разреживания равномерно по площади вырубались ель (65% по числу стволов), береза (80%) и сосна (60%), при втором разреживании – 80, 65 и 50% стволов (от числа сохранившихся после первого приема деревьев) соответственно, при третьем разреживании – 15, 60 и 70% стволов (от числа сохранившихся после второго приема деревьев) соответственно. Проведение трехприемных рубок ухода в лиственно-хвойных насаждениях, произрастающих в условиях таежной зоны Европейского Севера России, дало положительный лесоводственный эффект. В результате проводимых рубок ухода увеличился среднегодовой прирост по диаметру, высоте стволов и запасу стволовой древесины. Рубками ухода к 74-летнему возрасту насаждений удалось из лиственно-хвойного сформировать хвойно-лиственный древостой, где общий запас хвойной древесины составляет 67%. Проведением классических рубок ухода в лиственно-хвойных насаждениях удалось сформировать древостои с преобладанием хвойных пород, а также увеличить прирост по диаметру, высоте и объему сохраненных на доразращивание стволов деревьев.

Ключевые слова: древостой, рубки ухода, интенсивность, прирост, запас, продуктивность.

Surina E.A., Demidova N.A., Korchagov S.A., Konyushatov O.A., Gogoleva L.G. Increasing the productivity of deciduous and coniferous forest stands by thinning in the taiga zone. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 158–171 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.158-171

Deciduous coniferous forest stands occupy a significant area among the forests of the taiga zone. The formation of valuable coniferous formations in such areas is a fundamental goal of the forestry. One of the possible ways to achieve this goal is timely and quality thinning at various stages of forest stands formation. The aim of the study was to determine the silvicultural efficiency of three-stage thinning in deciduous coniferous forest stands formed in the taiga zone. Long-term scientific studies have been carried out since 1966 on permanent sample plots one of which is a control option, the second is an experimental version with thinning at the age of spruce 20, 28 and 40 years. During the first thinning, spruce (65% by the number of trunks), birch (80%) and pine (60%) were cut down evenly over the area, at the second rarefaction – 80, 65 and 50% of the trunks (of the number of trees preserved after the first intake), respectively, at the third thinning – 15, 60 and 70% of the trunks (of the number of trees preserved after the second intake), respectively. Carrying out three-stage thinning in deciduous and coniferous stands growing in the taiga zone of the European North of

Russia gave a positive silvicultural effect. As a result of thinning carried out, the average annual increase in diameter, height of trunks and stock of stem wood grew. By thinning by the age of 74 years of forest stands, it was possible to form a coniferous-deciduous stand from deciduous-coniferous stands, where the total stock of coniferous wood is 67%. By carrying out classical thinning in deciduous and coniferous forest stands, it was possible to form stands with a predominance of coniferous species, as well as to enhance the increase in diameter, height and volume of trees trunks saved for growing.

Key words: forest stand, thinning, intensity, growth, stock, productivity.

СУРИНА Елена Анатольевна – ведущий научный сотрудник ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-8159-8977. SPIN-код: 159131. WOS Research ID: IZQ-0959-2023. Scopus Author ID: 57329896400.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: surina_ea@sevniilh-arh.ru

SURINA Elena A. – PhD (Agricultural), Leading Researcher of FBI «Northern Research Institute of Forestry». ORCID: 0000-0002-8159-8977. SPIN-code: 159131. WOS Research ID: IZQ-0959-2023. Scopus Author ID: 57329896400.

163062, Nikitova str. 13. Arkhangelsk, Russia. E-mail: surina_ea@sevniilh-arh.ru

ДЕМИДОВА Наталья Анатольевна – ведущий научный сотрудник ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства». ORCID: 0000-0003-2673-2309. SPIN-код: 683777. WOS Research ID: T-1151-2019. Scopus Author ID: 57210768562.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: natalia.demidova@sevniilh-arh.ru

DEMIDOVA Natalia A. – Leading Researcher of FBI «Northern Research Institute of Forestry». ORCID: 0000-0003-2673-2309. SPIN-code: 683777. WOS Research ID: T-1151-2019. Scopus Author ID: 57210768562.

163062, Nikitova str. 13. Arkhangelsk, Russia. E-mail: natalia.demidova@sevniilh-arh.ru

КОРЧАГОВ Сергей Анатольевич – главный научный сотрудник Вологодской региональной лаборатории ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», доктор сельскохозяйственных наук, профессор. ORCID: 0000-0001-5492-9550. SPIN-код: 352518. WOS Research ID: HLQ-4954-2023. Scopus Author ID: 57221951065.

160014, ул. Горького, д. 83А, г. Вологда, Россия. E-mail: korchagov@sevniilh-arh.ru

KORCHAGOV Sergeyi A. – DSc (Agricultural), Principal Researcher of the Vologda Regional Laboratory FBU «Northern Research Institute of Forestry», Professor. ORCID: 0000-0001-5492-9550. SPIN-code: 352518. WOS Research ID: HLQ-4954-2023. Scopus Author ID: 57221951065.

160014, Gorky str. 83 A. Vologda, Russia. E-mail: korchagov@sevniilh-arh.ru

КОНЮШАТОВ Олег Алексеевич – научный сотрудник ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства», кандидат сельскохозяйственных наук. ORCID: 0009-0007-9819-4219. SPIN-код: 350257. WOS Research ID: JEZ-9194-2023.

160014, ул. Горького, д. 83А, г. Вологда, Россия. E-mail: konyushatov_oa@sevniilh-arh.ru

KONYUSHATOV Oleg A. – PhD (Agricultural), Researcher of FBI «Northern Research Institute of Forestry». ORCID: 0009-0007-9819-4219. SPIN-code: 350257. WOS Research ID: JEZ-9194-2023.

160014, Gorky str. 83 A. Vologda, Russia. E-mail: konyushatov_oa@sevniilh-arh.ru

ГОГОЛЕВА Людмила Георгиевна – научный сотрудник ФБУ «Северный научно-исследовательский институт лесного хозяйства». ORCID: 0000-0002-4876-892X. SPIN-код: 1061011. WOS Research ID: ABE-1664-2020. Scopus Author ID: 57219987384.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: lesovod@sevniilh-arh.ru

GOGOLEVA Ludmila G. – Researcher of FBI «Northern Research Institute of Forestry». ORCID: 0000-0002-4876-892X. SPIN-code: 1061011. WOS Research ID: ABE-1664-2020. Scopus Author ID: 57219987384.

163062, Nikitova str. 13. Arkhangelsk, Russia. E-mail: lesovod@sevniilh-arh.ru

А.О. Сорока, Е.И. Семенова, И.С. Недбаев, А.В. Константинов

ИНСТРУМЕНТАРИЙ ОЦЕНКИ УРОВНЯ ОПАСНОСТИ КЛИМАТИЧЕСКИХ РИСКОВ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

Введение. Изменения климата, фиксируемые на территории Российской Федерации, влекут за собой возрастание опасности климатических рисков. Под климатическими рисками понимается потенциал негативных последствий для человека или экосистем от воздействия изменения климата. Неопределенность в отношении перечня климатических рисков: зачастую к ним относят процессы и явления, не связанные напрямую с метеорологическими параметрами, например, оползни и сели¹, – влечет за собой разночтения в трактовках касательно самих рисков и их последствий. Конкретность в определении климатических рисков необходима, так как в настоящее время в мероприятия климатической политики включаются инвесторы, финансирующие различного рода проекты [Константинов, Матвеев, 2020; Salisu et al., 2024].

Целью настоящего исследования является обоснование системы показателей для оценки уровня опасности климатических рисков в лесном хозяйстве.

Для достижения обозначенной цели были решены следующие задачи:

- изучены основные подходы к определению климатических рисков в лесном хозяйстве;
- обоснован перечень климатических рисков, которые целесообразно оценивать для планирования адаптации лесного хозяйства Российской Федерации;
- исследованы последствия проявлений климатических рисков в лесных экосистемах;
- определены показатели, позволяющие оценивать уровень опасности климатических рисков в лесном хозяйстве.

Материалы и методика исследования. Для обоснования системы показателей в отношении каждого климатического риска был произведён поиск научной литературы с использованием электронных библиотек (e-library, Research Gate). Основной информационной базой выступили дан-

¹ Об утверждении Методических рекомендаций по оценке возможного ущерба от воздействия климатических рисков, в том числе рекомендаций по формированию перечня климатически уязвимых объектов в отраслях экономики, в субъектах Российской Федерации и Методических рекомендаций по мониторингу и оценке эффективности и результативности мер по адаптации к изменениям климата: Приказ Минэкономразвития России от 28 декабря 2023 г.

ные государственного лесного реестра (формы ГЛР), отчетность об осуществлении органами государственной власти субъектов Российской Федерации переданных полномочий в области лесных отношений (формы ОИП) и метеорологические данные, представленные в научно-прикладном справочнике «Климат России»².

Для настоящей оценки климатических рисков использовался опыт разработки методик оценки уязвимости лесов и оценки уровня адаптации к климатическим изменениям [Недбаев и др., 2023; Семенова и др., 2024].

Результаты исследования. Существуют различные подходы и методики оценки климатических рисков. Выделяют физические климатические риски, связанные с природными явлениями, возникающими вследствие изменения климата. Физические климатические риски, в свою очередь, подразделяются на экстренные, вызванные внезапными катастрофическими событиями (опасные метеорологические, гидрологические, геофизические явления, а также природные пожары), и систематические, связанные с долгосрочными изменениями климатических условий (подъем уровня океана, увеличение средней температуры воздуха, изменение состояния окружающей среды)³.

Приказом Минэкономразвития России от 13.05.2021 № 267 утверждены методические рекомендации и показатели по вопросам адаптации к изменениям климата. Согласно данному документу климатический фактор – это параметр климатической системы, меняющийся под воздействием внутренней динамики или в силу воздействий на эту систему внешних факторов, таких как колебания солнечной радиации, изменение химического состава атмосферы и т. д. Климатический (климатообусловленный) риск – это характеристика вероятности опасных проявлений климатического фактора и его воздействия в виде вреда или ущерба.

Изменения климата по-разному влияют на лесные экосистемы, при этом факторы действуют как в масштабе насаждения, так и в масштабе ландшафта. Они могут повлиять на физиологию и фенологию отдельных видов деревьев, что приводит к изменениям в структуре лесных сообществ [Boulanger et al., 2017]. Одновременно с этим увеличивается количество лесных пожаров [Boulanger et al., 2012] и вспышек вредителей [Matthews et al., 2011]. В Лесном плане субъекта РФ⁴ выделяются пять климатических рисков, характерных для лесного хозяйства, которые достоверно отображают все возможные последствия изменений климата в лесах.

² Научно-прикладной справочник «Климат России» // ВНИИГМИ-МЦД. 2024. URL: <http://aisori-m.meteo.ru/climspm/> (дата обращения: 23.05.2024).

³ Technical Expert Group on Sustainable Finance Taxonomy: Technical Report. 2019.

⁴ Об утверждении типовой формы и состава лесного плана субъекта Российской Федерации, порядка его подготовки и внесения в него изменений : приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 20.12.2017 № 692.

В результате проведённого анализа для каждого из этих рисков разработана система показателей для оценки (табл. 1). Ниже каждый риск и показатели к нему будут рассмотрены подробнее.

Таблица 1

Показатели для оценки климатических рисков в лесном хозяйстве

Indicators for climate risk assessment in forestry

Климатический риск	Показатель
Риск изменения продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадаемых осадков	Изменение общего среднего прироста на гектар по отношению к базовому периоду 1990–1999 гг., тыс. м ³ /га
	Процент очень засушливых дней по ГТК Селянинова, %
Риск изменения в видовом (породном) составе лесов	Изменение площади хвойных пород по сравнению с базовым периодом 1990–1999 гг., %
	Изменение площади твердолиственных пород по сравнению с базовым периодом 1990–1999 гг., %
	Процент очень засушливых дней по ГТК Селянинова, %
Риск увеличения частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами	Отношение числа лесных пожаров к площади лесных земель, шт./тыс.га
	Отношение площади погибших лесных насаждений к площади лесных земель, %
	Отношение площади, пройденной огнём, к площади лесных земель, %
	Среднее количество дней в месяц с уровнем горимости более II, %
Риск увеличения частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах	Относительная площадь очагов вредных организмов, %
	Изменение отношения площади погибших от повреждения вредителями и болезнями леса лесных насаждений к площади лесных земель, %
	Процент повторяемости вспышек массового размножения вредных организмов на территории более 2% от площади лесных земель, %
	Процент очень засушливых дней по ГТК Селянинова, %
Риск увеличения частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах	Изменение относительной гибели лесов от погодных условий и почвенно-климатических факторов по сравнению с базовым периодом, %
	Изменение количества экстремальных погодных явлений на территории субъекта в сравнении с базовым периодом, шт.
	Среднее число дней со скоростью ветра более 20 м/с, сут

Риск изменения продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадающих осадков

Изменение климата оказывает значительное влияние на продуктивность лесов. Влажность и температура влияют на фотосинтетическую активность и рост деревьев, что, в свою очередь, отражается на общей продуктивности лесных экосистем.

Увеличение количества осадков может способствовать росту растений. Однако, если осадков становится больше, чем необходимо лесам для оптимального развития, это может привести к повышению уровня грунтовых вод и ухудшению условий для роста. Изменение количества выпадающих осадков сказывается на влагообеспеченности территории, что отражает значение ГТК Селянинова (отношение суммы осадков в мм за период со среднесуточными температурами воздуха выше 10 °С к сумме температур за это же время).

Риск изменения в видовом (породном) составе лесов

Географическое распределение древесных пород в значительной мере зависит от климатических условий, прежде всего от минимальной температуры воздуха и временной нехватки влаги в жаркий период года [Александров, Проказин, 2018]. Климатические изменения приводят к преобразованию границ ареалов различных древесных пород, поэтому один из климатических рисков в области лесного хозяйства – это изменение видового состава лесов. Согласно прогнозам северные европейские виды древесной растительности будут значительно подвержены воздействию изменяющегося климата. Сокращение их ареалов может привести к негативным последствиям как для лесного хозяйства, так и для природных экосистем [Прожерина, Наквасина, 2022].

Для оценки климатических изменений также используется гидротермический коэффициент (ГТК) Селянинова. В период с 2007 по 2012 годы на всей территории лесостепной зоны и подзоны широколиственных лесов России отмечался рост засушливости, что характеризовалось снижением ГТК на 0,2–0,3. В сочетании с увеличением суммы активных температур это может способствовать остепнению территорий на южной границе лесной зоны, если тенденции сохраняются в будущем [Виноградова и др., 2015; Мусиевский, 2022].

Таким образом, основными показателями, отражающими риск изменения в видовом (породном) составе лесов, являются изменение площадей хвойных и твердолиственных пород и ГТК Селянинова.

Риск увеличения частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами

Пожары являются серьёзной угрозой для лесного хозяйства, нанося существенный ущерб⁵. Для возникновения лесного пожара необходимо сочетание нескольких факторов, таких как: наличие горючего материала, наличие источника возгорания и совокупность метеорологических условий, таких как малое количество осадков и высокая температура. Последний фактор отражает индекс пожарной опасности Нестерова, который может быть использован для оценки риска лесных пожаров в связи с климатическими изменениями [Шерстюков, 2009; Мазаник и др., 2020]. Например, ключевым фактором усиления пожарной активности в Якутии (субъекте с наибольшей площадью лесных пожаров) является тенденция повышения средних температур воздуха мая и июня и уменьшения весенних осадков [Петров, Федоров, 2023]. В соответствии с прогностическими моделями, на всех временных интервалах и при любом сценарии просматривается общая тенденция усиления в XXI веке роли метеорологических факторов, способствующих возникновению лесных пожаров почти во всех районах лесной зоны России [Шерстюков, Шерстюков, 2007]. Согласно прогнозам относительно того, что наблюдалось в период 2003–2020 годов, частота экстремальных пожаров вырастет на 21% в конце столетия при сценарии RCP 2.6, на 45% при сценарии RCP 4.5, на 107% в конце столетия при сценарии 8.5 [Швиденко и др., 2013; Александрова, 2020; Brown et al., 2023].

Риск увеличения частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах

Одним из климатических факторов, значительно влияющих на риски размножения вредителей и болезней леса, является засуха, наиболее часто приводящая к выходу популяции насекомого из состояния стабильности, росту плодовитости, выживаемости, снижению эффективности естественных врагов и биологической устойчивости насаждений [Лямцев, 2023]. Примерами могут служить вспышки короедов, которые нанесли ущерб миллионам гектаров хвойных лесов в Северной Америке [Pureswaran et al., 2015], и пядениц, уничтоживших одну треть лиственных лесов на севере Финноскандии [Vindstad et al., 2018]. Серьезную опасность представляют также инвазивные вредоносные виды, расширяющие свой ареал вследствие смягчения климата.

⁵ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2023 год. М., 2024. 104 с.

Масштабы воздействия вспышек вредных организмов на леса отражает показатель относительной площади очагов вредных организмов к общей площади лесов субъекта, выраженный в процентах. Данный показатель имеет значительный разброс как от субъекта к субъекту, так и во времени на территории одного региона. По ранее проведенным расчетам ФБУ «СПбНИИЛХ» данный риск может изменяться от 0% до 68% (Краснодарский край), в среднем достигая значения 2,8% за период наблюдений. Повторяемость вспышек массового размножения вредителей выражена в отношении количества лет, когда фиксировались вспышки на площади более 2% от площади лесных земель субъекта, к периоду наблюдений. Помимо площадей очагов вредных организмов значимым показателем является изменение отношения площади погибших от повреждения вредителями и болезнями леса лесных насаждений к площади лесных земель.

Риск увеличения частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах

Одним из самых значимых по ущербу для лесов экстремальных погодных явлений является сильный ветер [Шихов и др., 2023]. Для территории Европы выделяют три основных климатических драйвера роста площади ветровалов в условиях современного потепления. К ним относятся возможное увеличение частоты и интенсивности зимних штормов, а также ожидаемый аналогичный тренд для конвективных шквалов и смерчей в теплый период года. Вероятное увеличение количества и интенсивности осадков при прохождении внетропических циклонов также может способствовать росту площадей ветровалов [Koven et al., 2020; Senf, Seidl, 2021].

Важнейшим показателем данного риска является динамика возникновения экстремальных погодных явлений, в первую очередь – аномальных осадков и сильного ветра. Аномалии среднегодовых осадков могут быть как экстремально высокими (превышение нормы на 20%), так и низкими, приводящими к засухе (меньше нормы более чем на 20%). Возникновение аномальных осадков может приводить как напрямую к катастрофическим последствиям (сели, наводнения и т. д.), так и оказывать косвенный эффект, ослабляя древостой и увеличивая тем самым риски возникновения ветровалов, вспышек насекомых, лесных пожаров. Сильный ветер (больше 20 м/с) способен вызывать повреждения насаждений, появление ветровалов и буреломов, приводящих к гибели древостоя.

Значение гибели лесов от воздействия экстремальных погодных явлений достаточно сильно изменяется как в пространственном, так и во временном отношении. Информативным является показатель изменения гибели лесов по отношению к лесопокрытой площади субъекта.

Заключение. Применяемая в настоящее время в лесном планировании Российской Федерации классификационная система рисков, вызванных климатическими изменениями, является оптимальной для изучения последствий изменений климата в лесах и реализации мер по адаптации лесного хозяйства, что подтверждается научными исследованиями в данной области.

В ходе настоящего исследования был обоснован перечень показателей, позволяющих проводить оценку уровня опасности климатических рисков. Система показателей включает в себя как ретроспективные данные о состоянии лесов, так и климатические параметры.

Разработанная система показателей оценки уровня опасности климатических рисков в лесном хозяйстве опирается на прагматичный подход и подкреплена новейшими научными данными в области динамики лесных экосистем под воздействием факторов климатической изменчивости.

Сведения о финансировании. Исследование выполнено в рамках государственного задания Федерального агентства лесного хозяйства от 15.01.2024 № 053-00012-24-00 по теме «Разработка системы планирования, реализации и оценки эффективности мер государственной климатической политики в лесном секторе Российской Федерации» (шифр 2-Д24 климатическая политика).

Благодарности. Авторы выражают благодарность рецензентам и редактору за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Александров Г.А., Проказин Н.Е. Биоклиматические рамочные модели для климатипов лесных древесных пород // Лесохоз. информ. : электрон. сетевой журн. 2018. №1. С. 90–102. URL: http://lhi.vniilm.ru/PDF/2018/1/LHI_2018_01-08-Prokazin.pdf (дата обращения: 24.05.2024).

Александрова В.В. Климатические изменения и лесные пожары // Заметки ученого : Южный университет (ИУБиП). 2020. №20. С. 22–28.

Виноградова В.В., Титкова Т.Б., Черенкова Е.А. Динамика увлажнения и теплообеспеченности в переходных ландшафтных зонах по спутниковым и метеорологическим данным в начале XXI века // Совр. проблемы ДЗЗ из космоса. 2015. Т. 12. № 2. С. 162–172.

Константинов А.В., Матвеев С.М. Методический подход к оценке адаптационного потенциала лесных экосистем Российской Федерации // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2020. № 2. С. 14–33.

Лямцев Н.И. Методы прогнозирования угрозы вспышек массового размножения хозяйственно опасных лесных насекомых. Пушкино: ВНИИЛМ. 2023. 1 CD-ROM. Загл. с титул. Экрана. 62 с.

Мазаник А.И., Рыбаков А.В., Белоусов Р.Л., Араштаев А.И. Модель оценки влияния метеорологических параметров на уровень природной пожарной опасности // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2020. № 2 (45). С. 12–24.

Мусиевский А.Л. Тенденции в динамике лесного фонда Центральной лесостепи европейской части России за период 1966–2017 гг. // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2022. № 2. С. 58–69.

Недбаев И.С., Семенова Е.И., Сорока А.О. Оценка уязвимости лесов к климатическим изменениям // Охрана, инновационное восстановление и устойчивое управление лесами. Forestry – 2023 : матер. Междунар. лесного форума. 2023. С. 98–114. DOI: 10.58168/Forestry2023_98-114.

Петров М.И., Федоров А.Н. Влияние климатических условий на лесные пожары в Центральной Якутии // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2023. Т. 28(2). С. 248–260. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-248-260.

Прожерина Н.А., Наквасина Е.Н. Изменение климата и его влияние на адаптацию и внутривидовую изменчивость хвойных пород Европейского Севера России // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. № 2. С. 9–25. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25.

Семенова Е.И., Сорока А.О., Недбаев И.С. Пространственная дифференциация лесов субъектов Российской Федерации на основе авторской методики оценки уровня адаптации к изменениям климата // Лесотехнический журнал. 2024. Т. 14. № 1(53). С. 16–34. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/2.

Швиденко А.З., Щепаченко Д.Г. Климатические изменения и лесные пожары в России // Лесоведение. 2013. Т. 5. С. 50–61.

Шерстюков А.Б. Изменения климата и их последствия в зоне многолетней мерзлоты России: монография. Обнинск: ГУ «ВНИИГМИ-МЦД», 2009. 127 с.

Шерстюков Б.Г., Шерстюков А.Б. Лесные пожары на территории России при потеплении климата в XXI веке / ВНИИГМИ-МЦД. 2007. С. 300–313. URL: http://downloads.igce.ru/publications/pemem/PEMEM25/15_Sherstyukov_Sherstyukov.v.pdf (дата обращения: 24.05.2024).

Шихов А.Н., Чернокульский А.В., Калинин Н.А., Пьянков С.В. Ветровалы в лесной зоне России и условия их возникновения : монография. Пермь, 2023. 284 с.

Boulanger Y., Arseneault D., Morin H., Jardon Y., Bertrand P., Dagneau C. Dendrochronological reconstruction of spruce budworm (*Choristoneura fumiferana* Clem.) outbreaks in southern Québec for the last 400 years // Canadian Journal of Forest Research. 2012. Vol. 42. P. 1264–1276. DOI: 10.1139/x2012-069.

Boulanger Y., Price D.T., Cyr D., Sainte-Marie G. Stand-level drivers most important in determining boreal forest response to climate change // Journal of Ecology. 2017. Vol. 106(3). P. 977–990. DOI: 10.1111/1365-2745.12892.

Brown P.T., Hanley H., Mahesh A., Reed C., Strenfel S.L., Davis S.J., Kochanski A.K., Clements C.B. Climate warming increases extreme daily wildfire growth risk in California // *Nature*. 2023. Vol. 621. P. 760–766. DOI: 10.1038/s41586-023-06444-3.

Koven Ch., Knox R., Fisher R., Chambers J.O., Christoffersen B.O., Davies S.J., Detto M., Dietze M.C., Faybishenko B., Holm L., Huang M., Kovenock M., Kueppers L.M., Lemieux G., Massoud E., McDowell N.G., Muller-Landau H.C., Needham J.F., Norby R.J., Powell T., Rogers A., Serbin S.P., Shuman J.K., Swann A., Varadharajan C., Walker A., Wright S.J., Xu Ch. Benchmarking and parameter sensitivity of physiological and vegetation dynamics using the Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator (FATES) at Barro Colorado Island, Panama // *Biogeosciences*. 2020. Vol. 17. P. 3017–3044. DOI: 10.5194/bg-17-3017-2020.

Matthews S.N., Iverson L.R., Prasad A.M., Peters M.P., Rodewald P.G. Modifying climate change habitat models using tree species-specific assessments of model uncertainty and life history-factors // *Forest Ecology and Management*. 2011. Vol. 262. P. 1460–1472. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.06.047.

Pureswaran D.S., De Grandpre L., Pare D., Taylor A., Barrette M., Morin H., Kneeshaw D.D. Climate-induced changes in host tree-insect phenology may drive ecological state-shift in boreal forests // *Ecology*. 2015. Vol. 96. P. 1480–1491. DOI: 10.1890/13-2366.1.

Salisu A., Ogbonna A.A., Vinh V.X. Climate risks and the REITs market // *International Journal of Finance & Economics*. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ijfe.2983>.

Senf C., Seidl R. Persistent impacts of the 2018 drought forest disturbance regimes in Europe // *Biogeosciences*. 2021. Vol. 18. P. 5223–5230.

Vindstad O.P.L., Jepsen J.U., Ek M., Pepi A., Anker R. Can novel pest outbreaks drive ecosystem transitions in northern-boreal birch forest? // *Journal of Ecology*. 2018. Vol. 107, iss. 3. P. 1141–1153. DOI: 10.1111/1365-2745.13093.

References

Aleksandrov G.A. Bioclimatic framework models for climatotypes of forest tree species. *Lesokhoz. inform.* : electronic network journal, 2018, no. 1, pp. 90–102. URL: http://lhi.vniilm.ru/PDF/2018/1/LHI_2018_01-08_Prokazin.pdf (accessed May 24, 2024). (In Russ.)

Aleksandrova V.V. Climatic changes and forest fires. *Notes of a scientist*, 2020, no. 20 : Southern University (IUBiP), pp. 22–28. (In Russ.)

Boulanger Y., Arseneault D., Morin H., Jardon Y., Bertrand P., Dagneau C. Dendrochronological reconstruction of spruce budworm (*Choristoneura fumiferana* Clem.) outbreaks in southern Québec for the last 400 years. *Canadian Journal of Forest Research*, 2012, vol. 42, pp. 1264–1276. DOI: 10.1139/x2012-069.

Boulanger Y., Price D.T., Cyr D., Sainte-Marie G. Stand-level drivers most important in determining boreal forest response to climate change. *Journal of Ecology*, 2017, vol. 106(3), pp. 977–990. DOI: 10.1111/1365-2745.12892

Brown P.T., Hanley H., Mahesh A., Reed C., Strenfel S.L., Davis S.J., Kochanski A.K., Clements C.B. Climate warming increases extreme daily wildfire growth risk in California. *Nature*, 2023, vol. 621, pp. 760–766. DOI: 10.1038/s41586-023-06444-3.

Konstantinov A.V. Methodical approach to assessing the adaptation potential of forest ecosystems of the Russian Federation. *Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry*, 2020, no. 2, pp. 14–33. DOI: <https://doi.org/10.21178/2079-6080.2020.2.14>. EDN: DGYYYZ. (In Russ.)

Koven Ch., Knox R., Fisher R., Chambers J.O., Christoffersen B.O., Davies S.J., Detto M., Dietze M.C., Faybishenko B., Holm L., Huang M., Kovenock M., Kueppers L.M., Lemieux G., Massoud E., McDowell N.G., Muller-Landau H.C., Needham J.F., Norby R.J., Powell T., Rogers A., Serbin S.P., Shuman J.K., Swann A., Varadharajan C., Walker A., Wright S.J., Xu Ch. Benchmarking and parameter sensitivity of physiological and vegetation dynamics using the Functionally Assembled Terrestrial Ecosystem Simulator (FATES) at Barro Colorado Island, Panama. *Biogeosciences*, 2020, vol. 17, pp. 3017–3044. DOI: 10.5194/bg-17-3017-2020.

Lyamtsev N.I. Methods of forecasting the threat of outbreaks of mass reproduction of economically dangerous forest insects. Electronic resource. Pushkino: VNIILM, 2023. 62 p. 1 CD-ROM. (In Russ.)

Matthews S.N., Iverson L.R., Prasad A.M., Peters M.P., Rodewald P.G. Modifying climate change habitat models using tree species-specific assessments of model uncertainty and life history-factors. *Forest Ecology and Management*, 2011, vol. 262, pp. 1460–1472. DOI: 10.1016/j.foreco.2011.06.047.

Mazanik A.I., Rybakov A.V., Belousov R.L., Arashtaw A.I. Model for assessing the impact of meteorological parameters on the level of natural fire danger. *Scientific and educational problems of civil protection*, 2020, no. 2 (45), pp. 12–24. (In Russ.)

Musievskij A.L. Trends in the dynamics of the forest fund of the Central forest-steppe of the European part of Russia for the period 1966–2017. *Proceedings of the St. Petersburg Research Institute of Forestry*, 2022, no. 2, pp. 58–69. (In Russ.)

Nedbaev I.S., Semenova E.I., Soroka A.O. Assessment of forest vulnerability to climate change. *Forestry – 2023 : proceedings of the International Forestry Forum*, 2023, pp. 98–114. DOI: 10.58168/Forestry2023_98-114. (In Russ.)

Petrov M.I., Fedorov A.N. Influence of climatic conditions on forest fires in Central Yakutia. *Natural Resources of the Arctic and Subarctic*, 2023, vol. 28 (2), pp. 248–260. DOI: 10.31242/2618-9712-2023-28-2-248-260. (In Russ.)

Prozherina N.A., Nakvasina E.N. Climate change and its impact on adaptation and intraspecific variability of conifers of the European North of Russia. *IVUZ. Lesnoj zhurnal*, 2022, no. 2, pp. 9–25. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-2-9-25. (In Russ.)

Pureswaran D.S., De Grandpre L., Pare D., Taylor A., Barrette M., Morin H., Kneeshaw D.D. Climate-induced changes in host tree-insect phenology may drive ecological state-shift in boreal forests. *Ecology*, 2015, vol. 96, pp. 1480–1491. DOI: 10.1890/13-2366.1.

Salisu A., Ogbonna A., Vinh V.X. Climate risks and the REITs market. *International Journal of Finance & Economics*, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1002/ijfe.2983>.

Semenova E.I., Soroka A.O., Nedbaev I.S. Spatial differentiation of forests of the subjects of the Russian Federation based on the author's methodology for assessing the level of adaptation to climate change. *Lesotechnical Journal*, 2024, vol. 14, no. 1(53), pp. 16–34. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2024.1/2. (In Russ.)

Senf C., Seidl R. Persistent impacts of the 2018 drought on forest disturbance regimes in Europe. *Biogeosciences*, 2021, vol. 18, pp. 5223–5230.

Sherstyukov A.B. Climate changes and their consequences in the permafrost zone of Russia. Obninsk: State Institution VNIIGMI-MCD. 2009. 127 p. (In Russ.)

Sherstyukov B.G., Sherstyukov A.B. Forest fires on the territory of Russia under climate warming in the XXI century. VNIIGMI-MCD. Electronic resource. Official website. 2007, pp. 300–313. URL: http://downloads.igce.ru/publications/pemem/PEMEM25/15_Sherstyukov_Sherstyukov.pdf (accessed May 24, 2024). (In Russ.)

Shihov A.N., Chernokul'skij A.V., Kalinin N.A., P'yankov S.V. Windstorms in the forest zone of Russia and conditions of their occurrence : a monograph. Perm, 2023. 284 p. (In Russ.)

Shvidenko A.Z., Shchepashchenko D.G. Climatic changes and forest fires in Russia. *Lesovedenie*, 2013, vol. 5, pp. 50–61. (In Russ.)

Vindstad O.P.L., Jepsen J.U., Ek M., Pepi A., Anker R. Can novel pest outbreaks drive ecosystem transitions in northern-boreal birch forest? *Journal of Ecology*, 2018, vol. 107, iss. 3, pp. 1141–1153. DOI: 10.1111/1365-2745.13093.

Vinogradova V.V., Titkova T.B., Cherenkova E.A. Dynamics of moisture and heat supply in transitional landscape zones according to satellite and meteorological data at the beginning of the XXI century. *Modern problems of remote sensing from space*, 2015, vol. 12, no. 2, pp. 162–172. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.03.2024

Сорока А.О., Семенова Е.И., Недбаев И.С., Константинов А.В. Инструментарий оценки уровня опасности климатических рисков в лесном хозяйстве // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 172–185. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.172-185

Целью данного исследования является обоснование системы показателей оценки уровня опасности климатических рисков в лесном хозяйстве, которая позволит научно обоснованно идентифицировать и количественно оценить воздействие климатических факторов на лесные экосистемы, способствуя более эффективному управлению ресурсами и адаптации лесного хозяйства к изменениям климата. Данная система опирается на прагматичный подход, связанный с доступностью многолетних статистических данных, и подкреплена новейшими научными данными в области динамики лесных экосистем под

воздействием факторов климатической изменчивости. Система показателей может стать основой для процессов планирования реализации адаптационных мер в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов, в том числе в отношении основных климатических рисков, обусловленных изменениями продуктивности лесов в связи с изменениями средних значений температуры и количества выпадающих осадков, изменениями в видовом (породном) составе лесов, увеличением частоты возникновения (лесных) пожаров в лесах и площадей, пройденных пожарами, увеличением частоты вспышек массового размножения вредных организмов в лесах, а также увеличением частоты проявления последствий экстремальных погодных явлений в лесах. Данная работа направлена на формирование научного обоснования для комплексной оценки климатических рисков и разработку стратегии для их минимизации, что позволит обеспечить устойчивость лесного хозяйства к климатическим изменениям и поддерживать его экологическую и экономическую стабильность. Показатели могут быть интегрированы в существующие методы управления лесными ресурсами, способствуя улучшению практической реализации адаптационных мер и политик в сфере охраны окружающей среды.

Ключевые слова: климатические риски, лесное хозяйство, изменение климата, лесные экосистемы, оценка климатических рисков.

Soroka A.O., Semyonova E.I., Nedbaev I.S., Konstantinov A.V. Climate Risk Assessment Toolkit for Forestry. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 172–185 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.172-185

The purpose of this study was to substantiate the system of indicators for assessing the degree of danger of climate risks in forestry. Based on the results of the study of the main approaches to the definition of climatic risks in forestry and the study of their consequences, a system of indicators for assessing the degree of danger of climatic risks in forestry was developed and scientifically justified. This system of indicators for assessing the degree of danger of climate risks in forestry is based on a pragmatic approach associated with the availability of long-term statistical data, and is supported by the latest scientific data in the field of forest ecosystem dynamics under the influence of climate variability factors. The system of indicators can become the basis for planning the implementation of adaptation measures in the field of forest use, protection, conservation and reproduction, including with regard to the main climatic risks caused by changes in forest productivity due to changes in the average values of temperature and precipitation, changes in the species (types) composition of forests, an increase in the frequency of (forest) fires in forests and areas covered by fires, an increase in the frequency of outbreaks of mass reproduction of pests. This work is aimed at forming a scientific basis for a comprehensive assessment of climate risks and developing a strategy to minimize them, this will ensure the sustainability of

forestry to climate change and maintain its environmental and economic stability. The developed indicators can be integrated into existing forest management methods, contributing to the improvement of the practical implementation of adaptation measures and policies in the field of environmental protection.

Key words: climate risks, forestry, climate change, forest ecosystems, climate risk assessment.

СОРОКА Анастасия Олеговна – младший научный сотрудник НИО проблем изменения климата ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства». SPIN-код: 1169036. ORCID: 0009-0003-0602-34.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.soroka@spb-niilh.ru

SOROKA Anastasia O. – Junior Researcher of the research department of climate change problems of the St. Petersburg Research Institute of Forestry. SPIN-code: 1169036. ORCID: 0009-0003-0602-34.

194021. Institutskiy pr. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.soroka@spb-niilh.ru

СЕМЁНОВА Екатерина Игоревна – младший научный сотрудник НИО проблем изменения климата ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства». SPIN-код: 1169037. ORCID: 0000-0003-2176-845.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: e.semenova@spb-niilh.ru

SEMYONOVA Ekaterina I. – Junior Researcher of the research department of climate change problems of the St. Petersburg Research Institute of Forestry. SPIN-code: 1169037. ORCID: 0000-0003-2176-845.

194021. Institutskiy pr. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: e.semenova@spb-niilh.ru

НЕДБАЕВ Иван Сергеевич – младший научный сотрудник НИО проблем изменения климата ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства»; старший преподаватель ФГБОУ ВО «Санкт-Петербургский государственный университет», кандидат географических наук. SPIN-код: 99542. ORCID: 0000 0003-0407-7585.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия; 199034, Университетская наб., д. 7–9, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: i.nedbaev@spb-niilh.ru

NEDBAEV Ivan S. – PhD (Geographical), Junior Researcher of the research department of climate change problems of the St. Petersburg Research Institute of Forestry; Senior Lecturer, St. Petersburg State University. SPIN code: 995421. ORCID: 0000-0003-0407-7585.

194021, Institutskiy pr. 21. St. Petersburg. Russia; 199034. Universitetskaya nab. 7-9. St. Petersburg. Russia. E-mail: i.nedbaev@spb-niilh.ru

КОНСТАНТИНОВ Артем Васильевич – заместитель директора по научной работе, ведущий научный сотрудник НИО проблем изменения климата ФБУ «Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт лесного хозяйства»; доцент практики факультета технологического менеджмента и инноваций ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский университет ИТМО», доктор биологических наук. SPIN-код: 1953-6792. ORCID: 0000-0002-1864-9313.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: science@spb-niilh.ru; 197101, Кронверкский проспект, д. 49, лит. А. Санкт-Петербург, Россия. E-mail: avkonstantinov@itmo.ru

KONSTANTINOV Artem V. – DSc (Biological), Deputy Director for scientific work, leading researcher of the research department of climate change problems of the St. Petersburg Research Institute of Forestry; Associate Professor at the Faculty of Technological Management and Innovation, National Research University ITMO. SPIN-code: 1953-6792. ORCID: 0000-0002-1864-9313. 194021.

Institutskiy pr. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: science@spb-niilh.ru; 197101. Kronverksky pr. 49. Let. A. St. Petersburg. Russia. E-mail: avkonstantinov@itmo.ru

Е.П. Верховцева, Ж.А. Бруева, П.А. Феклистов, А.В. Грязькин

**МОРФОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ЯГОД И УРОЖАЙНОСТЬ
ЧЕРНИКИ (*VACCINIUM MYRTILLUS* L.)
В РАЗНЫХ ТИПАХ ЛЕСА В СЕВЕРНОЙ ТАЙГЕ**

Введение. Одним из важнейших направлений исследований является изучение динамики биологических ресурсов вообще и пищевых в частности. Использование этих ресурсов регламентируется Лесным кодексом¹, ст. 25, 34 и 35. Однако использование этих ресурсов недостаточно и часто не находит отражение даже в сценариях лесопользования [Коптев и др., 2023]. Одним из важнейших пищевых ресурсов в северной тайге является черника (*Vaccinium myrtillus* L.). Оценки этого ресурса имеются в многочисленных публикациях, вышедших в разных регионах страны [Лукин, Чертовской, 1974; Фриш, 1979; Астрологова, Наквасина, 1982; Астрологова, 1992; Астрологова, 2012; Петров, 2012; Казанцева и др., 2016; Торопова, Старицын, 2019]. На первый взгляд кажется, что вопрос достаточно хорошо изучен. Однако при более внимательном рассмотрении на зонально-типологической основе видно, что это не так. Например, урожайность ягод черники сильно варьирует даже в одном типе леса в разных регионах. Урожайность ягод в северной тайге ХМАО составляет в среднем 453,7 кг/га [Казанцева и др., 2016], в Архангельской области в северной тайге – 110–190 кг/га [Астрологова, 1992], в справочнике [Таксационный..., 2018] – от 70 до 140 кг/га, в среднетаежных лесах Карелии – 180–540 кг/га [Петров, 2012], в средней подзоне тайги Архангельской области – 981 кг/га [Старицын, Беляев, 2012]. Для получения данных урожайности нередко использовалась только одна пробная площадь в сосняке черничном, но в динамике за несколько лет [Астрологова, 1998]. Кроме этого, важно учесть влияние древостоя на формирование нижних ярусов растительности [Иванова, 2023] и влияние пожаров [Гаврилова и др., 2023]. В то же время наряду с природными сукцессиями происходит и антропогенная трансформация лесов [Бурова, Феклистов, 2007]. Это происходит прежде всего в связи с различного рода рубками [Панин и др., 2021], прокладкой дорог,

¹ Лесной кодекс Российской Федерации от 04.12.2006 № 200-ФЗ.

разработкой месторождений полезных ископаемых и т. п. В связи с этим для рационального использования такого ресурса важным является его оценка в коренных и производных лесах на разных этапах сукцессионных изменений.

Целью нашей работы было проведение морфометрических исследований зарослей черники под пологом наиболее распространенных в типологическом отношении сосняков

Материалы и методика исследования. Исследования выполнялись на территории Приморского района Архангельской области (Исакогорское участковое лесничество). Это северная подзона тайги [Курнаев, 1973]. Были подобраны однородные участки разных типов сосняков: сосняк черничный влажный, сосняк черничный и сосняк кустарничково-сфагновый. Все они близки по возрасту, по составу чистые или с небольшой примесью других пород и отличаются по бонитету (табл. 1).

Таблица 1

Таксационная характеристика пробных площадей

Taxation characteristics of sample plots

№ п/п	Тип леса	Состав	Порода	Средние		Полнота		Возраст, лет	Бонитет	Запас, м ³ /га
				диам., см	высота, м	абс., м ² /га	относ.			
1	С.черн. влажн.	9С1Б	С	19,2	17,6	26,9	0,79	90	4	234
2	С. черн	9С1Б	С	21,6	17,8	28,2	0,83	88	4	246
3	С. куст-сф.	10С ед.Б	С	13,1	10,5	16	0,69	89	5	87

Закладка пробных площадей осуществлялась в соответствии с общепринятыми методиками и рекомендациями [Программа..., 1966; Анучин, 1982; Гусев, 2000; Андреева и др., 2002; Усольцев, 2007; Лесная таксация, 2023]. При определении типа леса пользовались лесотипологической схемой В.Н. Сукачева [Программа..., 1966].

Для изучения растений напочвенного покрова традиционно геоботаниками закладываются площадки 10×10 м. Однако Б.М. Миркин [1976] провел специальные исследования по этому поводу и пришел к выводу, что размеры можно уменьшить в зависимости от количества растений. Указанная площадь приемлема, если число видов 20 и менее. При большем числе видов до-

статочно закладывать геоботанические площадки 2×2 м для получения той же точности. Этот размер больше подходит к нашим объектам. Например, в ельниках черничных и сосняках отмечалось более 50 видов растений травяно-кустарничкового и мохово-лишайникового ярусов. В то же время было показано, что при отсутствии антропогенного влияния для точного выявления всех видов достаточна площадь в 8–10 м² [Бурова, Феклистов, 2007]. В связи с этим мы приняли за основу закладку площадок 1×1 м по диагонали пробной площади в количестве 10 шт. в систематической последовательности через каждые 3 м. Растения определялись с использованием известных пособий и определителей [Губанов и др., 2002–2004; Флора..., 2013]. Описание растений проводили по ярусам: травяно-кустарничковому и мохово-лишайниковому – с указанием проективного покрытия в %.

На всех площадках были собраны ягоды черники и затем по этим данным получены: количество ягод на каждой площадке, масса ягод в свежем состоянии, диаметр ягод, высота. Всего обмерено около 1300 ягод. На основе всех этих данных были получены все статистические показатели, а также биологический и эксплуатационный запас.

Биологический запас рассчитывали по верхнему пределу урожайности:

$$B = Y + 2m, \quad (1)$$

где B – биологический запас, кг/га; Y – средняя урожайность черники, кг/га; m – ошибка среднего арифметического, кг/га.

Эксплуатационный запас (Е) (промысловый) рассчитывается уменьшением до нижнего предела урожайности:

$$E = Y - 2m, \quad (2)$$

Анализ и обработка данных проводились с использованием пакета программ Microsoft Office [Наследов, 2011; Бондаренко, Жигунов, 2016].

Обсуждение. Изучение размера ягод на трех пробных площадях в сосняках черничном влажном, черничном и кустарничково-сфагновом показало, что размеры ягод на учетных площадках колеблются от 6,7 до 8,0 мм (табл. 2) Все рассчитанные показатели достоверны при уровне значимости 0,05. Критерий Стьюдента колеблется от 31 до 72. Изменчивость диаметра ягод черники варьирует от 12 до 19%. В среднем размер диаметра ягоды в этом типе леса составляет $7,21 \pm 0,05$ мм.

Размеры ягод в сосняке черничном мало отличаются от сосняка черничного влажного. Они колеблются от 6,3 до 7,7 мм на разных учетных площадках. Все показатели также достоверны при уровне значимости 0,05 (табл. 3). В среднем размер ягод в этом типе леса – $7,12 \pm 0,06$ мм.

Таблица 2

Диаметр ягод черники (мм) в сосняке черничном влажном

The diameter of bilberries (mm) in moist bilberry pine forest

Статистические показатели	Номера учетных площадок									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Среднее, мм	8,0	7,26	6,7	7,4	7,3	6,9	6,9	7,8	7,1	7,5
Ст. отклонение, мм	1,2	1,2	1,1	1,3	0,9	0,9	1,3	1,2	1,0	1,2
Ошибка среднего, мм	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
Козф. изменчивости, %	15	17	16	17	13	12	19	15	14	16
Точность, %	1,7	0,0	0,0	2,4	2,4	2,6	3,1	3,2	2,9	2,7
Достоверность	60	69	72	42	41	39	32	31	34	37

Примечание: $t_{0,05} = 1.98$.

Таблица 3

Диаметр ягод черники (мм) в сосняке черничном

The diameter of bilberries (mm) in bilberry pine forest

Статистические показатели	Номера учетных площадок									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Среднее, мм	7,2	7,7	7,0	6,3	6,9	7,4	7,2	6,8	7,5	7,2
Ст. отклонение, мм	1,6	1,5	1,2	1,0	1,2	1,2	1,2	0,8	1,2	1,0
Ошибка среднего, мм	0,2	0,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3
Козф. изменчивости, %	23	19	17	15	17	17	16	11	15	14
Точность, %	3,2	4,1	2,4	2,7	3,1	2,2	1,9	2,4	2,4	3,7
Достоверность	31	25	41	37	33	45	53	42	42	27

Примечание: $t_{0,05} = 1.98$.

Диаметр ягод в сосняке кустарничково-сфагновом, еще более отличающемся по увлажнению почвы от сосняка черничного влажного, колеблется на разных учетных площадках от 6,4 до 7,4 мм; коэффициент изменчивости варьирует по площадкам от 12 до 18%. Все показатели достоверны при уровне значимости 0,05. В среднем размер ягод в сосняке кустарничково-сфагновом составляет $7,06 \pm 0,06$ мм (табл. 4)

Таблица 4

Диаметр ягод черники (мм) в сосняке кустарничково-сфагновом
The diameter of bilberries (mm) in the shrub-sphagnum pine forest

Статистические показатели	Номера учетных площадок									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Среднее, мм	7,1	7,1	7,0	7,4	7,1	7,2	6,4	7,2	6,9	6,7
Ст. отклонение, мм	1,2	1,2	0,9	1,3	1,2	1,0	0,9	1,0	0,8	1,1
Ошибка среднего, мм	0,2	0,2	0,2	0,2	0,1	0,2	0,2	0,3	0,2	0,2
Коэф. изменчивости, %	17,5	16,6	12,8	17,3	17,0	13,7	13,4	13,9	11,6	16,2
Точность, %	2,8	2,9	2,8	2,3	1,9	2,3	2,6	4,6	3,1	3,2
Достоверность	36	35	36	44	53	43	38	22	32	31

Примечание: $t_{0,05} = 1.98$.

Казалось бы, по средним значениям средний диаметр ягод в сосняке черничном влажном несколько выше, чем в сосняке черничном, то есть более высокая влажность почвы ведет к некоторому увеличению диаметра. Однако сравнение средних значений по критерию Стьюдента показывает, что различия недостоверны. Критерий Стьюдента равен 1,11. Сравнение диаметра ягод в сосняке черничном влажном и сосняке кустарничково-сфагновом также показывает, что различия недостоверны, критерий Стьюдента – 1,90.

Таким образом, сравнение диаметров ягод черники в разных типах леса показывает, что несмотря на разные условия произрастания диаметр ягод черники одинаков.

Интересно сравнение количества ягод на учетных площадках, которые располагались в разных точках однородного выдела (в систематической последовательности через каждые 3 м) в разных типах леса. Оказалось, что в сосняке черничном влажном наблюдается большой разброс по количеству ягод – от 23 до 173 шт. на 1 м². В сосняке черничном разброс составил от 14 до 73 шт. на 1 м², в сосняке кустарничково-сфагновом от 9 до 80 ягод на 1 м².

Среднее количество ягод на площадке в 1 м² в сосняке черничном влажном – 62 шт., в черничном – 39 шт. (т. е. почти в два раза меньше), в кустарничково-сфагновом – 34 шт. (табл. 5). То есть при одинаковых размерах ягод их количество в сосняке черничном влажном значительно больше, в то время как в сосняке черничном и кустарничково-сфагновом почти одинаково. В то же время обращает на себя внимание тот факт, что количество ягод по пло-

щади распределено неравномерно и сильно изменяется. Для сосняка черничного влажного коэффициент изменчивости составляет 88%, в сосняке черничном – 48%, а в сосняке кустарничково-сфагновом – 63% (табл. 5).

Таблица 5

Среднее количество ягод на учетных площадках (шт.)

The average number of bilberries on the subplots (pcs.)

Тип леса	Статистические показатели					
	Среднее знач., шт.	Станд. откл., шт.	Ошибка сред, шт.	Коэф.изм., %	Точность, %	Достовер.
С.черн.вл.	61,6	53,9	17,1	87,6	27,7	3,6
С. черн.	38,9	18,6	5,9	47,9	15,1	6,6
С. куст. сф.	33,9	21,2	6,7	62,6	19,8	5,1

Примечание: $t_{0,05} = 2.10$

В соответствии с количеством ягод на 1 м^2 находится их масса. Самая большая масса – в сосняке черничном влажном, она достигает 20 г/м^2 (рис. 1), что значительно больше, чем в сосняке черничном (12 г/м^2) и сосняке кустарничково-сфагновом (10 г/м^2). Судя по планкам погрешностей (ошибка среднего), различия в сосняке черничном и сосняке кустарничково-сфагновом, хотя и несколько разные, но достоверно не различаются.

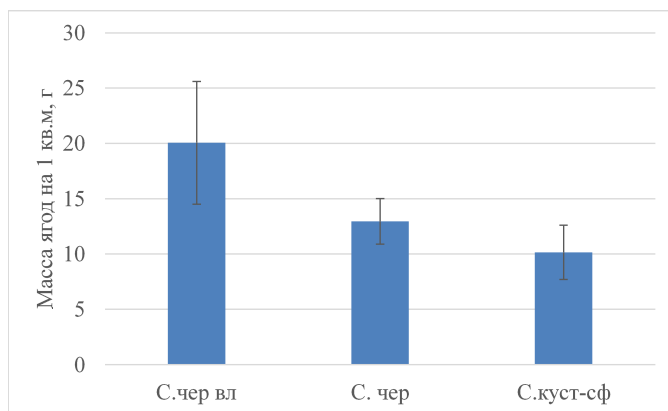


Рис. 1. Средняя масса ягод в разных типах леса

Fig. 1. The average weight of bilberries in different types of forests

В разных типах леса параметры ягод черники в основном различались и весьма существенно, за исключением диаметра, как было показано ранее. Высота ягод достоверно отличалась от диаметра: критерий Стьюдента соответственно для сосняка черничного влажного – 8,12, для сосняка черничного – 6,15, для сосняка кустарничково-сфагнового – 8,83 при $t_{0,05}$ 2,01. В то же время высота ягоды в сосняке черничном влажном и сосняке черничном достоверно не отличалась ($t = 0,78$), а вот высоты ягод в сосняке черничном и сосняке кустарничково-сфагновом различались достоверно ($t = 3,81$). Проективное покрытие на учетных площадках самым высоким было в сосняке черничном (78%), а в сосняке кустарничково-сфагновом и черничном влажном – соответственно 65 и 67%. (табл. 6). Варьировало количество ягод на учетной площадке. Наибольшим количеством характеризовался сосняк черничный влажный, там количество ягод составило 62 шт./м², в других типах немного меньше. Интересна изменчивость массы ягод: она максимальна в сосняке черничном влажном (20 г/м²), в черничном и кустарничково-сфагновом почти в два раза меньше (12 и 10 г/м² соответственно). С учетом такой разной массы определилась и урожайность черники. Она колебалась по типам леса от 102 до 201 кг/га.

Таблица 6

Параметры ягодников черники и биологический и эксплуатационный запас
Parameters of bilberry berries and biological and operational reserve
operational reserve of pine forest

Тип леса	Среднее проективное покрытие, %	Кол-во ягод, шт./м ²	Масса ягод, г/м ²	Параметры ягод			Средняя урожайность ягод, кг/га	Биологический запас, кг/га	Эксплуатационный запас, кг/га
				Средняя масса 1 ягоды, г	Средний диаметр ягоды, мм	Средняя высота ягоды, мм			
С. чер.вл	67,00± 6,33	61,6± 17,05	20,06± 5,55	0,32± 0,01	7,21± 0,05	6,69± 0,04	200,6	311,6	89,6
С. чер.	78±3,35	38,9± 5,89	12,95± 2,07	0,34± 0,08	7,12± 0,06	6,64± 0,05	129,5	170,9	88,1
С. куст-сф.	64,5± 4,86	33,9± 6,71	10,16± 2,45	0,28± 0,02	7,06± 0,06	6,37± 0,05	101,6	150,6	52,6

Несмотря на то, что данных по урожайности черники в целом немало, они весьма противоречивые и разнородные, часто не привязаны к типу леса или приводятся для черничного типа леса. Наши результаты более всего согласуются с данными Л.Е. Астрологовой [1992], но они даны только для сосняка черничного. Весьма интересные данные приводятся для Дарвин-

ского заповедника (юг Вологодской области) для сосняка чернично-бруснично-зеленомошного [Фриш, 1979]. Здесь средняя урожайность черники составляет 676 кг/га. Но интересно другое: средняя масса ягоды 0,33 г, а у нас 0,32 г, пункты исследования удалены друг от друга на сотни км, а масса практически одна. Следовательно, в конечном итоге урожайность определяется количеством ягод на 1 м².

Для оценки потенциала черники для типа леса или региона нередко используется показатель проективного покрытия, то есть запасы ягод привязываются к проективному покрытию или соответствию урожая проективному покрытию. Такой подход для приближенной оценки имеет право на существование. Однако на урожай влияет масса других факторов, как связанных с биологическими особенностями фитоценозов черники, так и экологических: возраст кустов черники, полнота древостоя, его состав, метеоусловия во время цветения, различного рода рубки [Панин и др., 2021], мелиорация и т. п., то есть связь не всегда однозначна. Оценка зависимости урожая от проективного покрытия в разных типах сосняков показала, что в сосняке черничном эта зависимость проявляется (рис. 2). При проективном покрытии 50–60% масса ягод находится примерно на одном уровне, и лишь при дальнейшем увеличении начинает расти и урожай. Для других типов леса такой четкой зависимости не получили, имеется лишь некоторый тренд увеличения урожая с увеличением проективного покрытия.

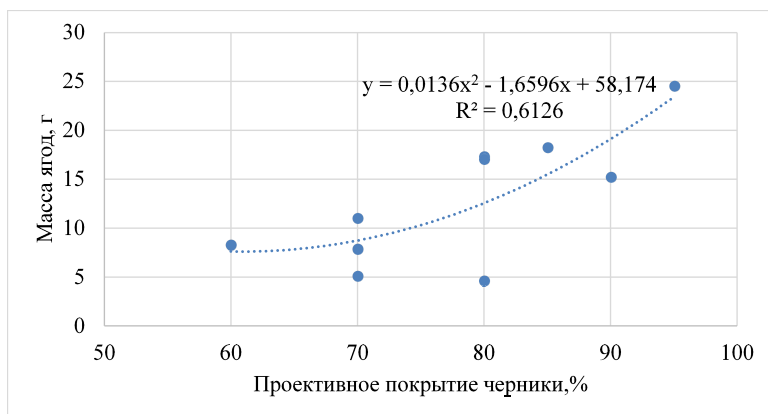


Рис. 2. Зависимость массы ягод (г/м²) от проективного покрытия в сосняке черничном

Fig. 2. Dependence of the mass of bilberries (g/m²) on the projective coating in blueberry pine forest

Заключение

- диаметр ягод в сосняке черничном влажном, черничном и кустарничково-сфагновом соответственно следующий: $7,21 \pm 0,05$ мм; $7,12 \pm 0,06$ мм; $7,06 \pm 0,06$ мм. Различия имеются, но по критерию Стьюдента недостоверны при уровне значимости 0,05. В разных условиях местопроизрастания диаметр ягод одинаков;
- средняя масса одной ягоды по типам леса соответственно $0,32 \pm 0,01$ г; $0,34 \pm 0,08$ г; $0,28 \pm 0,02$ г;
- количество ягод в разных типах леса на площадке 1 м^2 разное: в сосняке черничном влажном – 62 шт./ м^2 , в черничном – 39 шт./ м^2 , то есть почти в два раза меньше, в сосняке кустарничково-сфагновом – 34 шт./ м^2 . Количество ягод на 1 м^2 варьирует по площади выдела наиболее сильно в сосняке черничном влажном и кустарничково-сфагновом и более стабильно в черничном;
- самая большая масса ягод – в сосняке черничном влажном (20 г/м^2), в сосняке черничном – 12 г/м^2 , в сосняке кустарничково-сфагновом – 10 г/м^2 ;
- средняя урожайность ягод черники следующая: в сосняке черничном влажном – 200,6 кг/га, в сосняке черничном – 129,5 кг/га, в сосняке кустарничково-сфагновом – 101,6 кг/га. Эксплуатационный запас соответственно 89,6; 88,1; 52,6 кг/га. Доступный же для сбора запас ягод будет еще меньше, для его расчета требуется учитывать целый ряд факторов и прежде всего транспортную доступность;
- четкой зависимости массы ягод на 1 м^2 от проективного покрытия не обнаружили. Такая связь прослеживается для сосняка черничного, но имеется лишь тренд для сосняка черничного влажного и сосняка кустарничково-сфагнового.

Вклад авторов. Все авторы в равной степени участвовали в написании статьи.

Сведения о финансировании исследования. Исследования проводились в рамках государственного задания Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова УрО РАН (№ гос. регистрации – 122011400384-2).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Библиографический список

Андреева Е.Н., Баккал И.Ю., Горшков В.В., Лянгузова И.В., Мазная Е.А., Неиштаев В.Ю., Неиштаева В.Ю. Методы изучения лесных сообществ. СПб.: НИИХ, 2002. 240 с.

Анучин Н.П. Лесная таксация : [Учеб. для лесохоз. и лесоинж. спец. вузов]. 5-е изд., доп. М.: Лесн. пром-сть, 1982. 552 с.

Астрологова Л.Е. Урожайность черники в сосняках черничных Архангельской области // Лесной журнал. 1992. № 4. С. 74–78.

Астрологова Л.Е. Изменение структуры и продуктивности растений в процессе восстановления соснового древостоя. Архангельск: АГТУ, 1998. 156 с.

Астрологова Л.Е. Урожайность черники в сосняках черничных Архангельской области в 2010–2011 годах // Экологические проблемы Арктики и северных территорий: межвузовский сборник научных трудов. Архангельск: Изд-во САФУ, 2012. Вып. 15. С. 72–74.

Астрологова Л.Е., Наквасина Е.Н. Интенсивность плодоношения черники в сосняках черничных Архангельской области // Растительные ресурсы. 1982. Т. 18. Вып. 1. С. 30–33.

Бондаренко А.С., Жигунов А.В. Статистическая обработка материалов лесоводственных исследований. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. 125 с.

Бурова Н.В., Феклистов П.А. Антропогенная трансформация пригородных лесов. Архангельск: Изд-во Арх. гос. техн. ун-та, 2007. 264 с.

Гаврилова О.И., Грязькин А.В., Чэн Тун, Семенова Е.И. Состав и запасы ресурсных видов растений на постпирогенных землях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 243. С. 28–45. DOI: 10.21266/2079–4304.2023.243.28–45.

Губанов И.А., Киселева К.В., Новиков В.С., Тихомиров В.Н. Иллюстрированный определитель растений Средней России. М.: МГУ, 2002–2004. В 4 т.

Гусев И.И. Таксация древостоя: учеб. пособие. Архангельск: Изд-во АГТУ, 2000. 72 с.

Иванова Н.С. Влияние древостоя на фитомассу и видовое разнообразие травяно-кустарничкового яруса в горных лесах Южного Урала // Лесной вестник. 2023. Т. 27. № 4. С. 14–22. DOI: 10.18698/2542–1468–2023–4–14–22.

Казанцева М.Н., Глазунов В.А., Николаенко С.А. Продуктивность дикорастущих ягодников Тазовских тундр // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2016. № 11–2. С. 356–356.

Коптев С.В., Третьяков С.В., Ильинцев А.С., Дрожжин Д.П., Шамонтьев И.Г. Многовариантные сценарии динамики использования лесов Архангельской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2023. Вып. 246. С. 191–205. DOI: 10.21266/2079–4304.2023.246.191–205.

Курнаев С.Ф. Лесорастительное районирование СССР. 1973. 203 с.

Лесная таксация. Ч. 4. Закладка и описание пробных площадей при проведении научных исследований и подготовке выпускных квалификационных работ: учеб. пособие. Архангельск: САФУ, 2023. 119 с.

Лукин И.Н., Чертовской В.Г. Урожайность и запасы дикорастущих ягод, грибов и лекарственных растений в Архангельской области // Повышение продуктивности лесов Европейского Севера. 1974. С. 211–219.

Миркин Б.М. О некоторых требованиях, предъявляемых к исходным данным геоботанического исследования с использованием аппарата математической ста-

истики // Аспекты оптимизации количественных исследований растительности. АН СССР Башкирский филиал институт биологии. Уфа, 1976. С. 36–60.

Наследов А. SPSS 19: профессиональный статистический анализ данных. СПб.: Питер, 2011. 400 с.

Панин И.А., Аржанников Ю.А., Боярский А.А., Грудцын А.А. Влияние проходных рубок на ресурсы черники обыкновенной Североуральской среднегорной лесорастительной провинции // Леса России и хозяйство в них. 2021. № 1 (76). С. 4–12. DOI: 10.51318/FRET.2021.31.56.002

Петров Н.В. Особенности и оценка ресурсного потенциала лесов в разных типах географического ландшафта северо-запада таежной зоны России (на примере Республики Карелия): автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. СПб., 2012. 20 с.

Программа и методика биогеоценологических исследований / В.Н. Сукачев, Н.В. Дылис. М.: Наука, 1966. 332 с.

Старицын В.В., Беляев В.В. Показатели урожайности черники (*Vaccinium myrtillus* L.) и брусники (*Vaccinium vitis-idaea* L.) на территории Плесецкого тектонического узла Архангельской области // Экологические проблемы Арктики и северных территорий: межвуз. сб. науч. тр. Архангельск: Изд-во САФУ, 2012. Вып. 15. С. 69–71.

Таксационный справочник по лесным ресурсам России (за исключением древесины). Пушкино: ВНИИЛМ, 2018. 282 с.

Торопова Е.В., Старицын В.В. Морфобиологические особенности *Vaccinium myrtillus* L. в экотонной зоне лес – вырубка, в подзоне северной тайги Архангельской области // Экологические проблемы северных регионов и пути их решения: тез. докл. VII Всерос. Междунар. науч. конф. Апатиты, 2019. С. 91–92.

Усольцев В.А. Биологическая продуктивность лесов Северной Евразии: методы, база данных с ее приложениями. Екатеринбург: УрО РАН, 2007. 636 с.

Флора средней полосы России: атлас-определитель. М.: ООО Фитон 21, 2013. 544 с.

Фриш В.А. Сезонное развитие и урожайность черники в Дарвинском заповеднике в 1972–1974 годах // Труды Дарвинского государственного заповедника. Вологда: Северо-Западное книжное изд-во, 1979. Вып. 15: Болота и болотные ягодники. С. 156–162.

References

Andreeva E.N., Bakkal I.Y., Gorshkov V.V., Lyanguzova I.V., Maznaya E.A., Neshataev V.Y., Neshataeva V.Y. Methods of studying forest communities. St. Petersburg: Publishing House of the Research Institute of Chemistry, 2002. 240 p. (In Russ.)

Anuchin N.P. Forest taxation : [Study. for forestry. and lesoinj. special universities]. 5th ed., add. M.: Lesn. prom-st, 1982. 552 p. (In Russ.)

Astrologova L.E. Bilberry yield in bilberry pine forests of the Arkhangelsk region in 2010–2011. *Environmental problems of the Arctic and Northern territories: An interuniversity collection of scientific papers*, 2012, iss. 15, pp. 72–74. (In Russ.)

Astrologova L.E. Bilberry yield in bilberry pine forests of the Arkhangelsk region. *Lesnoy zhurnal*, 1992, no. 4, pp. 74–78. (In Russ.)

Astrologova L.E. Changes in the structure and productivity of plants in the process of restoration of a pine stand. Arkhangelsk: AGTU, 1998. 156 p. (In Russ.)

Astrologova L.E., Nakvasina E.N. The intensity of bilberry fruiting in bilberry pine forests of the Arkhangelsk region. *Plant resources*, 1982, vol. 18, iss. 1, pp. 30–33. (In Russ.)

Bondarenko A.S., Zhigunov A.V. Statistical processing of forestry research materials. St. Petersburg, Polytechnic Univer. Publishing House, 2016. 125 p. (In Russ.)

Burova N.V., Feklistov P.A. Anthropogenic transformation of suburban forests. Arkhangelsk: Publishing House of the Arch. State Technical University, 2007. 264 p. (In Russ.)

Flora of the central part of Russia: atlas-identification guide. M.: LLC Fiton 21, 2013. 544 p. (In Russ.)

Forest taxation. Part 4. Laying and description of trial areas during scientific research and preparation of final qualifying works: textbook. Arkhangelsk: SAFU, 2023. 119 p. (In Russ.)

Frish V.A. Seasonal development and yield of bilberries in the Darwin Nature Reserve in 1972–1974. *Proceedings of the Darwin State Nature Reserve*. Vologda: North-Western Book Publishing House, 1979, iss. 15: Swamps and swamp berry fields, pp. 156–162. (In Russ.)

Gavrilova O.I., Gryazkin A.V., Cheng Tong, Semenova E.I. Composition and reserves of resource plant species on post-pyrogenic lands. *Izvestiya St. Petersburg Forestry Academy*, 2023, iss. 243, pp. 28–45. DOI: 10.21266/2079–4304.2023.243.28–45. (In Russ.)

Gubanov I.A., Kiseleva K.V., Novikov V.S., Tikhomirov V.N. Illustrated field guide of plants of Central Russia. M.: Moscow State University, 2002–2004. In 4 vol. (In Russ.)

Gusev I.I. Taxation of the stand: a textbook. – Arkhangelsk: Publishing House of AGTU, 2000. 72 p. (In Russ.)

Ivanova N.S. The influence of the stand on the phytomass and species diversity of the grass–shrub layer in the mountain forests of the Southern Urals. *Forest Bulletin*, 2023, vol. 27, no. 4, pp. 14–22. DOI: 10.18698/2542–1468–2023–4–14–22. (In Russ.)

Kazantseva M.N., Glazunov V.A., Nikolaenko S.A. Productivity of wild berry bushes of the Taz tundra. *International Journal of Applied and Fundamental Research*, 2016, no. 11–2, pp. 356–356. (In Russ.)

Koptev S.V., Tretyakov S.V., Ilyintsev A.S., Drozhzhin D.P., Shamontyev I.G. Multivariate scenarios for the dynamics of forest use in the Arkhangelsk region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2023, iss. 246, pp. 191–205. DOI: 10.21266/2079–4304.2023.246.191–205. (In Russ.)

Kurnaev S.F. Forest-growing zoning of the USSR. 1973. 203 p. (In Russ.)

Lukin I.N., Chertovskoy V. G. Productivity and stocks of wild berries, mushrooms and medicinal plants in the Arkhangelsk region. *Increasing productivity of forests of the European North*, 1974, pp. 211–219. (In Russ.)

Mirkin B.M. On some requirements for the initial data of geobotanical research using the apparatus of mathematical statistics. *Aspects of optimization of quantitative vegetation studies*. Bashkir branch of the Institute of Biology of the USSR Academy of Sciences. Ufa, 1976, pp. 36–60. (In Russ.)

Nasledov A. SPSS 19: Professional statistical data analysis. St. Petersburg: Peter, 2011. 400 p. (In Russ.)

Panin I.A., Arzhannikov Yu.A., Boyarsky A.A., Grudtsyn A.A. The influence of logging on the resources of bilberries of the ordinary North Ural mid-mountain forest province. *Forests of Russia and their management*, 2021, no. 1 (76), pp. 4–12. DOI: 10.51318/FRET.2021.31.56.002. (In Russ.)

Petrov N.V. Features and assessment of the resource potential of forests in different types of the geographical landscape of the North–West of the taiga zone of Russia (on the example of the Republic of Karelia): autoref. diss. ... of the Candidate of Agriculture. Sciences'. St. Petersburg, 2012. 20 p. (In Russ.)

Program and methodology of biogeocenological research / V.N. Sukachev, N.V. Dylis. M: Nauka, 1966. 332 p. (In Russ.)

Staritsyn V.V., Belyaev V.V. Yield indicators of bilberries (*Vaccinium myrtillus* L.) and cranberries (*Vaccinium vitis-idaea* L.) on the territory of the Plesetsk tectonic node of the Arkhangelsk region. *Environmental problems of the Arctic and Northern territories*: An interuniversity collection of scientific papers. Arkhangelsk: SAFU Publishing House, 2012, vol. 15, pp. 69–71. (In Russ.)

Taxational handbook on Russian forest resources (except wood). Pushkino: VNIILM, 2018. 282 p. (In Russ.)

Toropova E.V., Staritsyn V.V. Morphobiological features of *Vaccinium myrtillus* L. in the forest-cutting ecoregion, in the northern taiga subzone of the Arkhangelsk region. *Ecological problems of the northern regions and ways to solve them*: Abstracts of the VII All-Russian International Scientific Conference. Apatity, 2019, pp. 91–92. (In Russ.)

Usoltsev V.A. Biological productivity of forests of Northern Eurasia: methods, database with its applications. Yekaterinburg; Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 636 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 26.04.2024

Верховцева Е.П., Бруева Ж.А., Феклистов П.А., Грязькин А.В. Морфометрические параметры ягод и урожайность черники (*Vaccinium myrtillus* L.) в разных типах леса в северной тайге // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 186–201. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.186-201

Исследования выполнялись на территории Приморского района Архангельской области в разных типах сосняков: в сосняке черничном влажном, сосняке черничном и сосняке кустарничково-сфагновом. Древостои близки по

возрасту, чистые по составу или с небольшой примесью других пород. На площадках 1×1 м, заложенных по диагонали пробной площади в систематической последовательности, были собраны ягоды черники и затем по этим данным получены: количество ягод на каждой площадке, масса ягод в свежем состоянии, диаметр ягод, высота. Установлено, что диаметр ягод в разных типах леса колебался от $7,06 \pm 0,06$ до $7,21 \pm 0,05$ мм. Различия по критерию Стьюдента недостоверные. Высота ягод (от места прикрепления до самой нижней точки) достоверно различается. Самая высокая ягода – в сосняке черничном влажном, затем идет по убыванию в сосняке черничном и самая низкая – в сосняке кустарничково-сфагновом. Средняя масса одной ягоды в сосняке черничном влажном – $0,32 \pm 0,01$ г; в сосняке черничном – $0,34 \pm 0,08$ г; в сосняке кустарничково-сфагновом – $0,28 \pm 0,02$ г. Среднее количество ягод в разных типах леса на площадке 1 м^2 разное: в сосняке черничном влажном – 62 шт./м^2 , в черничном – 39 шт./м^2 , то есть почти в два раза меньше, а в сосняке кустарничково-сфагновом – 34 шт./м^2 . Самая большая масса ягод в сосняке черничном влажном – 20 г/м^2 , в сосняке черничном – 12 г/м^2 и в сосняке кустарничково-сфагновом – 10 г/м^2 . Средняя урожайность ягод черники следующая: в сосняке черничном влажном – $200,6 \text{ кг/га}$, в сосняке черничном – $129,5 \text{ кг/га}$, в сосняке кустарничково-сфагновом – $101,6 \text{ кг/га}$. Четкой зависимости массы ягод на 1 м^2 от проективного покрытия нет, но имеется тренд: чем больше проективное покрытие, тем больше масса ягод на 1 м^2 .

Ключевые слова: черника, ягоды, урожайность, биологический запас, тип леса, сосняки.

Verkhovtseva E.P., Brueva J.A., Feklistov P.A., Gryazkin A.V. Morphometric parameters of berries and productivity of bilberry (*Vaccinium myrtillus* L.) in different types of forests in the northern taiga. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 186–201 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.186-201

The research was carried out on the territory of the Primorsky district of the Arkhangelsk region in different types of pine forests: moist bilberry pine, bilberry pine and shrub-sphagnum pine. Forest are close in age and pure in composition or with a small admixture of other species. Bilberries were collected in a systematic sequence on 1×1 m sites laid diagonally across the test area. Then, using these data, we obtained: the number of bilberries on each site, the mass of bilberries in fresh condition, the diameter of bilberries, the height of bilberries. It was found that the diameter of bilberries in different types of forest ranged from 7.06 ± 0.06 to 7.21 ± 0.05 mm. The differences according to the Student's criterion are unreliable. The height of bilberries from the place of attachment to the lowest point significantly differs. The highest bilberry berry is in the moist bilberry pine, then it goes down in the bilberry pine and the lowest in the shrub-sphagnum pine. The average weight of one bilberry berry in moist bilberry pine is 0.32 ± 0.01 g; in bilberry

pine – 0.34 ± 0.08 g; and in shrubby sphagnum pine – 0.28 ± 0.02 g. The average number of bilberries in different types of forest on a site of 1 m^2 is different: in the moist bilberry pine – 62 pcs./ m^2 , in the bilberry pine – 39 pcs./ m^2 , that is almost half as much, and in the shrubby-sphagnum pine – 34 pcs./ m^2 . The largest mass of bilberries in the moist bilberry pine is 20 g/m^2 , in the bilberry pine – 12 g/m^2 and in the shrub-sphagnum pine – 10 g/m^2 . The average yield of bilberries is as follows: in the moist bilberry pine – 200.6 kg / ha , in the bilberry pine – 129.5 kg/ha , in the shrub-sphagnum pine 101.6 kg / ha . There is no clear dependence of the mass of bilberries per 1 m^2 on the projective coating, but there is a trend: the larger the projective cover is the greater the mass of berries per 1 m^2 will be.

Key words: bilberry, berries, productivity, biological reserve, forest type, pine forests.

ВЕРХОВЦЕВА Елена Павловна – аспирант ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ).

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: verkhovtseva@narfu.ru

VERKHOVTSEVA Elena P. – PhD student of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (SAFU).

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: verkhovtseva@narfu.ru

БРУЕВА Жанна Алексеевна – аспирант ФГАОУ ВО «Северный (Арктический) федеральный университет имени М.В. Ломоносова» (САФУ).

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: bruevazh@bk.ru

BRUEVA Zhanna A. – PhD student of Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov (SAFU)

163002. Severnaya Dvina emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: bruevazh@bk.ru

ФЕКЛИСТОВ Павел Александрович – главный научный сотрудник лаборатории приарктических лесных экосистем ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова» УрО РАН. ORCID: 0000-0001-8226-893X.

163020, Никольский пр., д. 20, г. Архангельск, Россия. E-mail: pfeklistov@yandex.ru

FEKLISTOV Pavel A. – Chief Researcher at the Laboratory of Arctic Forest Ecosystems of Federal Research Center for Integrated Arctic Studies named after Academician N.P. Laverov Ural Branch of the Russian Academy of Sciences. ORCID: 0000-0001-8226-893X.

163020. Nikolskiy av. 20. Arkhangelsk. Russia. E-mail: pfeklistov@yandex.ru

ГРЯЗЬКИН Анатолий Васильевич – профессор кафедры лесоводства Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор сельскохозяйственных наук. ORCID: 0000-0002-7901-2180.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: lesovod@bk.ru

GRYAZKIN Anatoly V. – DSc (Agricultural), Professor of the Department of Forestry, St.Petersburg State Forestry University. ORCID: 0000-0002-7901-2180.

1194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: lesovod@bk.ru

Ю.П. Демаков, Е.С. Шарапов, А.С. Королев, О.В. Шейкина

МЕТОДИКА ЭКСПРЕСС-ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ДРЕВЕСИНЫ В ЦЕНОПОПУЛЯЦИЯХ СОСНЫ ОБЫКНОВЕННОЙ

Введение. Ценопопуляции древесных растений представляют собой сложные самоорганизующиеся и саморазвивающиеся системы, в которых все деревья активно взаимодействуют между собой, оказывая друг на друга определенное влияние, исходя из своих наследственных, сугубо индивидуальных способностей, отраженных в их фенотипе [Животовский, 1984; Романовский, 1994; Цветков, 2004; Романовский, Щёкалев, 2014; Lilja, Kuuluvainen, 2005]. Одним из важнейших целевых параметров деревьев сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), на который следует ориентироваться при оценке хозяйственной и селекционной ценности их природных ценопопуляций, является плотность древесины [Полубояринов, 1976; Мелехов и др., 2003; Данилов, Степаненко, 2014; Тюкавина и др., 2017; Auty et al., 2014; Kimberley et al., 2016; Šilinskas et al., 2020; Fabisiak, Fabisiak, 2021; Konofalska et al., 2021; Szaban et al., 2023; Gil-Moreno et al., 2024; Sharapov et al., 2024]. Точность и трудоемкость процедуры оценки этого параметра во многом зависят от выбора ее методики, основанной на данных натурных исследований и законах математической статистики. Необходимым условием является также детальное изучение влияния на величину значений этого параметра внешних и внутренних факторов, в том числе и режимов выращивания насаждений, используя при этом новейший арсенал аппаратуры.

Целью данной работы являлась оптимизация методики оценки базисной плотности древесины в природных ценопопуляциях сосны обыкновенной, обеспечивающая необходимую ее точность и снижение трудозатрат.

Материалы и методы. Исследования проведены в 2023–2024 гг. на 38 объектах в чистых по составу древостоях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) разного возраста (от 30 до 240 лет), происхождения и условий произрастания, находящихся на территории Марийского Заволжья. На каждом из объектов у деревьев на высоте 1,3 м от корневой шейки измеряли диаметр ствола в коре и брали с северной его стороны с помощью бурава Пресслера (Haglöf Sweden AB, Лонгселе, Швеция) цилиндрические керны диаметром 5,15 мм и длиной 50 мм, которые помещали в индивидуальные пластиковые контейнеры для сохранения влажности древесины. Объем выборки кернов на каждом из объектов варьировал от 15 до 130 шт.

Лабораторные измерения и взвешивание образцов проводили в течение этого же дня. Базисную плотность древесины оценивали стереометрическим и гидростатическим способами. В первом случае объем влажного керна определяли по его геометрическим размерам (длине и среднему диаметру вдоль и поперек волокон), измеренным с помощью штангенциркуля с погрешностью $\pm 0,01$ мм. При использовании гидростатического способа оценки плотности древесины керн предварительно увлажняли для снижения вероятности образования пузырьков воздуха на его поверхности и погружали в измерительную емкость с дистиллированной водой при помощи металлической иглы без касания ее стенок и дна. Измерение массы вытесненной воды ($m_{\text{ов}}$) известной плотности ($\rho_{\text{ов}}$) проводили на весах Vibra ALE-623 (Shinko Denshi Co., Ltd., Токио, Япония) с погрешностью 10^{-6} кг. После этого керны высушивали при температуре 103°C до постоянной массы, для измерения которой использовали эти же весы. Для расчета базисной плотности древесины использовали следующие выражения: стереометрический способ:

$$\rho_c = m_0 / V_{\text{max}}, \quad (1)$$

гидростатический способ:

$$\rho_c = (m_0 \cdot \rho_{\text{ов}}) / m_{\text{ов}}, \quad (2)$$

где ρ_c , ρ_c – стереометрическая и гидростатическая плотность древесины керна (образца), $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$; m_0 – масса образца в абсолютно сухом состоянии, кг; V_{max} – объем образца керна цилиндрической формы при влажности древесины растущего дерева, м^3 ; $\rho_{\text{ов}}$ – плотность дистиллированной воды, $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$; $m_{\text{ов}}$ – масса вытесненной воды при погружении керна в емкость, кг.

Цифровой эмпирический материал обработан стандартными методами математической статистики [Зайцев, 1991; Гринин и др., 2003] на ПК с использованием пакетов прикладных программ MicrosoftExcel[®] 2016, SigmaPlot 14 (Systat Software Inc., Сан-Хосе, СА, США) и Statistica 10 (Dell, Паунд-Рок, TX, США). Определение достоверности различий между групповыми средними значениями параметров проведено с доверительной вероятностью 95%. Большие по объему выборки разбивали последовательно на ряд более мелких, используя это при расчетах для выбора оптимального их объема.

Результаты и их обсуждение. Первым этапом в оптимизации методики оценки плотности древесины у живых деревьев в лесу, не нарушающей их целостности и жизнеспособности, является выбор способа отбора образцов. Наиболее простым и надежным из них является использование бурава Пресслера (Haglöf Sweden AB, Лонгселе, Швеция), позволяющего извлекать цилиндрические керны древесины диаметром 5,15 мм

[Колесникова, 2002; Downes et al., 2018]. Для снижения влияния факторов, которые потенциально могут влиять на вариабельность оцениваемого параметра, керны целесообразно отбирать только с одной стороны деревьев (лучше с северной) на высоте 1,3 м от корневой шейки и сразу же помещать в герметичные индивидуальные замаркированные пластиковые контейнеры (пробирки) для исключения потерь влажности древесины. Керны должны охватывать только заболонную часть древесины, что соответствует их длине около 50 мм. Трудозатраты на взятие одного керна, его упаковку и маркировку не превышают при этом 2–3 мин.

Для определения плотности древесины применяют [Полубояринов, 1976] два способа – гидростатический и стереометрический. Расчеты показали, что различия между этими способами не превышают в большинстве случаев $\pm 3\%$ (рис. 1), т. е. не выходят за пределы требуемой точности опыта. В связи с этим оценивать величину данного параметра целесообразно более простым стереометрическим способом.

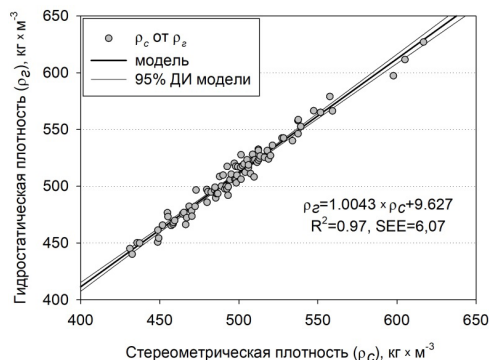


Рис. 1. Связь между значениями базисной плотности древесины, оцененной разными способами: ДИ – доверительный интервал для модели

Fig. 1. The relations between the base density values obtained by different methods: ДИ – confidence interval for the model

Исследования показали, что величина базисной плотности древесины изменяется у всей совокупности обследованных деревьев от 291 до 660 $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$, варьируя в каждой однородной по своим параметрам выборке в очень больших пределах. Установлено, что зависит она в основном от возраста деревьев (рис. 2), а также особенностей их генотипа [Лацевич, 2001; Мельник и др., 2007; Марущак, Максимов, 2014], которые четко проявились в архиве клонов. Условия же произрастания древостоев и их густота

существенного влияния на величину этого параметра не оказывают [Sharapov et al., 2024]. Плотность древесины очень слабо коррелирует также с диаметром ствола и его текущим приростом (рис. 3), исходя из чего оценку данного параметра в ценопопуляции можно проводить любым удобным способом (регулярно по ходовой линии или случайно) у средних по размеру деревьев. Весьма важно определиться при этом с оптимальным их количеством в выборке, обеспечивающим достижение необходимой точности оценки при наименьших трудозатратах. Теоретической основой является в этом случае закон Гаусса-Лапласа распределения величины оцениваемого показателя в генеральной совокупности, с которым хорошо согласуются наши эмпирические данные (рис. 4).

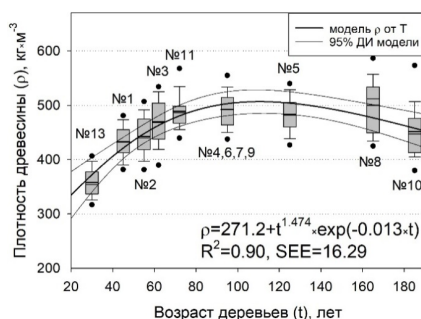


Рис. 2. Зависимость среднего значения базисной плотности древесины (ρ , $\text{кг} \times \text{м}^{-3}$) в ценопопуляции сосны обыкновенной от возраста древостоев (t , лет). R^2 – коэффициент детерминации, SEE – стандартная ошибка аппроксимации (коэффициенты модели значимы). Цифрами обозначены диаграммы размаха, соответствующие выборкам значений плотности. Границы «ящика» диаграмм размаха – 25-й и 75-й процентиля, границы «усов» – 10-й и 90-й процентиля, точки – 5-й и 95-й процентиля соответственно, тонкая линия в середине «ящика» – медиана, жирная линия – среднее.

Fig. 2. The dependence of the mean base density of the wood (ρ , $\text{kg} \times \text{m}^{-3}$) in the Scots pine cenopopulation on the tree age (t , years).

R^2 is a coefficient of determination, SEE is a standard error of estimate (the model coefficients are significant). The numbers indicate the box plots corresponding to the density value samples. The box boundaries of the box plots are the 25th and 75th percentiles, the boundaries of the whiskers are the 10th and 90th percentiles, the dots are the 5th and 95th percentiles, respectively, a thin line in the middle of the box is a median, and a bold line is the mean value.

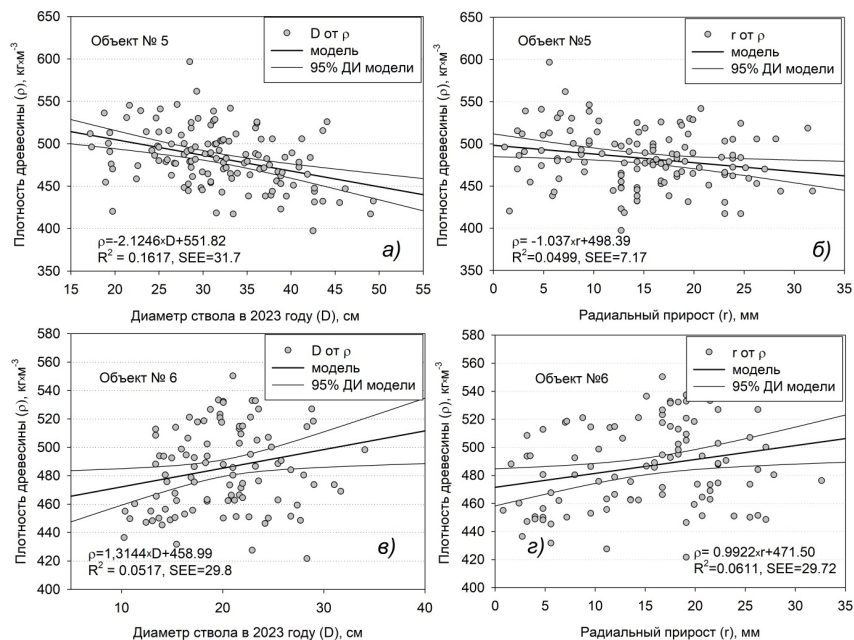


Рис. 3. Характер влияния диаметра деревьев и величины радиального прироста их ствола за последние 20 лет на величину базисной плотности древесины: ДИ – доверительный интервал модели; а, б – объект № 5 (125-летний сосняк брусничниковый (*Pinetum vacciniosum*)); в, г – объект № 6 (95-летний сосняк лишайниковый (*Pinetum cladinosum*))

Fig. 3. The influence type of a tree diameter and a radial increment value of a tree trunk for the recent 20 years on the base density value of wood: CI is a confidence interval for the model; а, b is Plot No.5 (a 125-year cowberry pine forest (*Pinetum vacciniosum*)); c, d is Plot No.6 (a 95-year lichen pine forest (*Pinetum cladinosum*))

Среднеквадратическое (стандартное) отклонение величины плотности древесины у деревьев в ценопопуляциях сосны обыкновенной, которое является основным критерием для обоснования необходимого объема выборки, в очень большой мере зависит, как было нами установлено, от среднего арифметического значения оцениваемого параметра (рис. 5). Расчеты показали, что для оценки среднего значения плотности древесины с погрешностью, не превышающей $\pm 3\%$, достаточно с вероятностью 99% взять керны у 20–25 деревьев (табл. 1). Для оценки же с погрешностью $\pm 5\%$ объем выборки можно снизить до 12–15 деревьев. Предельные значе-

ния плотности древесины у деревьев в ценопопуляциях варьируют от 75 до 140% относительно средней арифметической величины оцениваемого параметра и практически не зависят от нее.

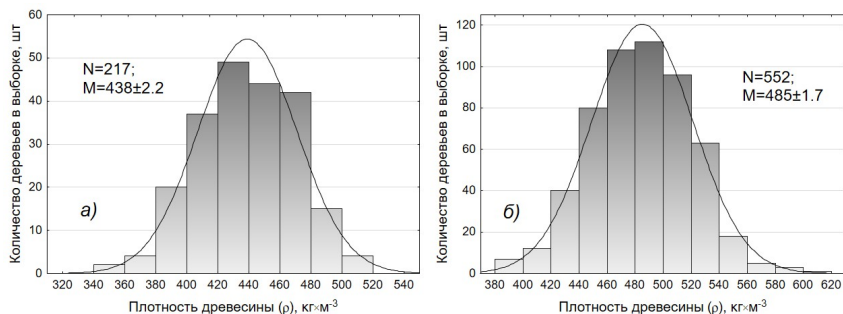


Рис. 4. Гистограммы распределения значений базисной плотности древесины у деревьев сосны обыкновенной в разных их ценопопуляциях: а – группа ценопопуляций с низкой плотностью древесины; б – группа ценопопуляций с высокой плотностью древесины

Fig. 4. Distribution bar charts of the base density values of Scots pine wood in the different pine cenopopulations: а – the cenopopulation group with a low wood density; б – the cenopopulation group with a high wood density

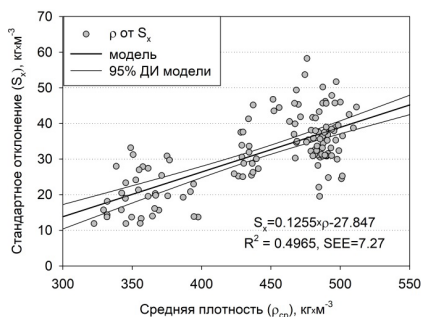


Рис. 5. Зависимость величины среднеквадратического отклонения базисной плотности древесины от среднего арифметического значения этого параметра в ценопопуляциях сосны обыкновенной

Fig. 5. The dependence of a mean-square deviation value of wood base density on the arithmetic mean value of this parameter in the Scots pine cenopopulations

Таблица 1

Влияние объема выборки в ценопопуляциях сосны обыкновенной на точность оценки плотности древесины**The influence of a sample size in the Scots pine cenopopulations on the accuracy of wood density assessment**

Объем выборки	Значения статистических показателей относительной погрешности оценки, %				
	$M \pm m$	$X_{\min}$	$X_{\max}$	S_x	$M+3 \times S_x$
15	$1,60 \pm 0,08$	0,87	2,69	0,49	3,06
20	$1,74 \pm 0,07$	0,90	2,74	0,37	2,85
25	$1,54 \pm 0,07$	0,91	2,11	0,32	2,51
30	$1,39 \pm 0,07$	0,87	2,13	0,34	2,42
50	$1,05 \pm 0,06$	0,76	1,49	0,21	1,69
100	$0,76 \pm 0,05$	0,63	0,96	0,11	1,11

Примечание: $M \pm m$ – среднее значение параметра и его ошибки; $X_{\min}$, $X_{\max}$ – минимальное и максимальное значения параметра; S_x – стандартное отклонение значений параметра; $M+3 \times S_x$ – возможный предел отклонения от среднего при вероятности 95%.

Закключение. Исследования показали, что для оценки среднего значения плотности древесины, которое может изменяться в ценопопуляциях сосны обыкновенной от 320 до 520 кг×м⁻³, достаточно взять керны у 20–25 средних по размеру деревьев, что обеспечит с вероятностью 99% погрешность не более $\pm 3\%$, а для оценки же с погрешностью $\pm 5\%$ – у 12–15. Минимальное и максимальное значения оцениваемого параметра теоретически будут составлять соответственно 75 и 140% относительно средней арифметической его величины в выборке. Деревья в ценопопуляциях для оценки данного параметра можно отбирать либо регулярно по ходовой линии, либо случайным образом, исключая лишь особи, резко выделяющиеся по размерам. Базисную плотность древесины целесообразнее оценивать стереометрическим способом, поскольку он по точности не уступает гидростатическому, который более сложен и трудоемок.

Сведения о финансировании. Работа выполнена за счет гранта Российского научного фонда № 23-16-00220 (<https://rscf.ru/project/23-16-00220/>).

Благодарности. Работа выполнена с использованием оборудования ЦКП «Экология, биотехнологии и процессы получения экологически чистых энергоносителей» Поволжского государственного технологического университета, г. Йошкар-Ола.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Гринин А.С., Орехов Н.А., Новиков В.Н. Математическое моделирование в экологии. М.: ЮНИТИ-ДАНА, 2003. 269 с.

Данилов Д.А., Степаненко С.М. Строение и плотность древесины ели и сосны в плантационных культурах Ленинградской области // Известия Санкт-Петербургской Лесотехнической Академии. 2014. Вып. 204. С. 35–45.

Животовский Л.А. Интеграция полигенных систем в популяциях. Проблемы анализа комплекса признаков. М.: Наука, 1984. 183 с.

Зайцев Г.Н. Математический анализ биологических данных. М.: Наука, 1991. 182 с.

Колесникова А.А. Исследование свойств древесины по кернам: Научное издание. Йошкар-Ола: Марийский Государственный Технический Университет, 2002. 178 с.

Лацевич А.В. Свойства древесины сосны обыкновенной разного географического происхождения // Труды Брянского государственного технологического университета. Серия: Лесное хозяйство. 2001. Вып. 9. С. 143–146.

Марущак В.Н., Максимов С.А. Наследуемость механических свойств у древесины у сосны обыкновенной в географических культурах // Вестник Алтайского Государственного Аграрного Университета. 2014. № 11 (121). С. 65–69.

Мелехов В.И., Бабич Н.А., Корчагов С.А. Качество древесины сосны в культурах. Архангельск.: Изд-во АГТУ, 2003. 110 с.

Мельник П.Г., Савосько С.В., Станко Я.Н., Дюжина И.А., Степанова О.В. Географическая изменчивость продуктивности и физико-механических свойств древесины сосны обыкновенной // Лесной Вестник. 2007. № 6. С. 33–38.

Полубояринов О.И. Плотность древесины. М.: Лесн. пром-сть, 1976. 160 с.

Романовский М.Г. Полиморфизм древесных растений по количественным признакам. М.: Наука, 1994. 96 с.

Романовский М.Г., Щекалев Р.В. Система вида у древесных растений. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2014. 212 с.

Тюкавина О. Н., Клевцов Д.Н., Дроздов И.И., Мелехов В.И. Плотность древесины сосны обыкновенной в различных условиях произрастания // ИВУЗ. Лесной журнал. 2017. № 6. С. 6–64. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.56

Цветков В.Ф. Лесной биогеоценоз. Архангельск: Изд-во Архангельского гос. тех. ун-та, 2004. 268 с.

Auty D., Achim A., Macdonald E., Cameron A.D., Gardiner B.A. Models for predicting wood density variation in Scots pine // Forestry: An International Journal of Forest Research. 2014. Vol. 87, iss. 3. P. 449–458. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>

Downes G.M., Lausberg M., Potts B.M., Pilbeam D.L., Bird M., Bradshaw B. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts // Australian Forestry. 2018. Vol. 81, iss. 3. P. 177–185. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1500676>

Fabisiak E., Fabisiak B. Relationship of tracheid length, annual ring width, and wood density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees from different social classes of tree position in the stand // *Bioresources*. 2021. Vol. 16, no. 4. P. 7492–7508. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7492-7508>

Gil-Moreno B., Manso R., O’Ceallaigh C., Harte A.M. The influence of age on the timber properties and grading of Scots pine and larch in Ireland // *Forestry: An International Journal of Forest Research*. 2024. Vol. 97, no. 1. P. 133–146. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad027>

Kimberley M.O., Cown D.J., McKinley R.B., Moore J.R., Dowling L.J. Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine // *New Zealand Journal of Forestry Science*. 2015. Vol. 45. P. 22. <https://doi.org/10.1186/s40490-015-0053-8>

Konofalska E., Kozakiewicz P., Buraczyk W., Szeligowski H., Lachowicz H. The technical quality of the wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of diverse genetic origin. // *Forests*. 2021. Vol. 12. No. 5. P. 619. <https://doi.org/10.3390/f12050619>

Lilja S., Kuuluvainen T. Structure of old *Pinus sylvestris* dominated forest stands along a geographic and human impact gradient in mid-boreal Fennoscandia // *Silva Fennica*. 2005. Vol. 39, no. 3. P. 407–428.

Sharapov E., Demakov Y., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physiological and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). // *Forests*. 2024. Vol. 15, no. 2. P. 233. <https://doi.org/10.3390/f15020233>

Šilinskas B., Varnagiryte-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušienė L., Aleinikovienė J., Škema M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites with different stand densities // *Forests*. 2020. Vol. 11. No. 5. P. 587. <https://doi.org/10.3390/f11050587>

Szaban J., Jelonek T., Okińczyc A., Kowalkowski W. Results of a 57-Year-Long Research on Variability of Wood Density of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) from Different Provenances in Poland // *Forests*. 2023. Vol. 14, no. 3. P. 480. <https://doi.org/10.3390/f14030480>

References

Auty D., Achim A., Macdonald E., Cameron A.D., Gardiner B.A. Models for predicting wood density variation in Scots pine. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2014, vol. 87, iss. 3, pp. 449–458. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpu005>

Danilov D.A., Stepanenko S.M. Structure and density of wood of spruce and pine in forest plantation of Leningrad region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2014, iss. 204, pp. 35–45. (In Russ.)

Downes G.M., Lausberg M., Potts B.M., Pilbeam D.L., Bird M., Bradshaw B. Application of the IML Resistograph to the infield assessment of basic density in plantation eucalypts. *Australian Forestry*, 2018, vol. 81, iss. 3, pp. 177–185. DOI: <https://doi.org/10.1080/00049158.2018.1500676>

Fabisiak E., Fabisiak B. Relationship of tracheid length, annual ring width, and wood density in Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) trees from different social classes of

tree position in the stand. *Bioresources*, 2021, vol. 16, no. 4, pp. 7492–7508. <https://doi.org/10.15376/biores.16.4.7492-7508>

Gil-Moreno B., Manso R., O’Ceallaigh C., Harte A.M. The influence of age on the timber properties and grading of Scots pine and larch in Ireland. *Forestry: An International Journal of Forest Research*, 2024, vol. 97, no. 1, pp. 133–146. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpad027>

Grinin A.S., Orekhov N.A., Novikov V.N. Mathematical modelling in the environmental studies. M.: UNITY-DANA Publ., 2003. 269 p. (In Russ.)

Kimberley M.O., Cown D.J., McKinley R.B., Moore J.R., Dowling L.J. Modelling variation in wood density within and among trees in stands of New Zealand-grown radiata pine. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 2015, vol. 45, p. 22. <https://doi.org/10.1186/s40490-015-0053-8>

Kolesnikova A.A. The study of wood properties based on cores: Scientific publication. Yoshkar-Ola: Mari State Technical University Publ., 2002. 178 p. (In Russ.)

Konofalska E., Kozakiewicz P., Buraczyk W., Szeligowski H., Lachowicz H. Thetechnical quality of the wood of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) of diverse genetic origin. *Forests*, 2021, vol. 12, no. 5, p. 619. <https://doi.org/10.3390/f12050619>

Lacevich A.V. Wood properties of Scots pine of different geographical origin. *Publications of the Bryansk State Technological University. Series: Forestry*, 2001, vol. 9, pp. 143–146. (In Russ.)

Lilja S., Kuuluvainen T. Structure of old *Pinus sylvestris* dominated forest stands along a geographic and human impact gradient in mid-boreal Fennoscandia. *Silva Fennica*, 2005, vol. 39, no. 3, pp. 407–428.

Marushchak V.N., Maksimov S.A. Heritability of mechanical properties of Scots pine wood in provenance trials. *Bulletin of Altai State Agricultural University*, 2014, vol. 121, no. 11, pp. 65–69. (In Russ.)

Melekhov V.I., Babich N.A., Korchagov S.A. Quality of pine wood in plantation. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University Publ., 2003. 110 p. (In Russ.)

Melnik P.G., Savosko S.V., Stanko Ya.N., Dyuzhina I.A., Stepanova O.V. Geographic variability of productivity and physical and mechanical properties of Scots pine wood. *Lesnoy vestnik / Forestry bulletin*, 2007, no. 6, pp. 33–38. (In Russ.)

Polubojarinov O.I. Wood Density. M.: Lesn. prom-st’ Publ., 1976. 160 p. (In Russ.)

Romanovskiy M.G. Qualitative polymorphism of ligneous plants. M.: Nauka Publ., 1994. 96 p. (In Russ.)

Romanovskiy M.G., Shchekalev R.V. A species system of ligneous plants. M.: Tovarishchestvo nauchnykh izdaniy KMK Publ., 2014. 212 p. (In Russ.)

Sharapov E., Demakov Y., Korolev A. Effect of Plantation Density on Some Physical and Technological Parameters of Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.). *Forests*, 2024, vol. 15, no. 2, p. 233. <https://doi.org/10.3390/f15020233>

Šilinskas B., Varnagiryte-Kabašinskiene I., Aleinikovas M., Beniušienė L., Aleinikovienė J., Škėma M. Scots pine and Norway spruce wood properties at sites

with different stand densities. *Forests*, 2020, vol. 11, no. 5, pp. 587. <https://doi.org/10.3390/f11050587>

Szaban J., Jelonek T., Okińczyc A., Kowalkowski W. Results of a 57-Year-Long Research on Variability of Wood Density of the Scots Pine (*Pinus sylvestris* L.) from Different Provenances in Poland. *Forests*, 2023, vol. 14, no. 3, pp. 480. <https://doi.org/10.3390/f14030480>

Tsvetkov V.F. Forest biogeocenosis. Arkhangelsk: Arkhangelsk State Technical University Publ., 2004. 268 p. (In Russ.)

Tyukavina O.N., Klevtsov D.N., Drozdov I.I., Melekhov V.I. Wood Density of Scots Pine in Different Growth Conditions. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2017, no. 6, pp. 56–64. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2017.6.56. (In Russ.)

Zaitsev G.N. Mathematical analysis of biological data. M.: Nauka, 1991. 182 p. (In Russ.)

Zhivotovskiy L.A. The integration of polygene systems in the populations. The issues of analyzing multiple properties. M.: Nauka Publ., 1984. 183 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 27.08.2024

Демаков Ю.П., Шарапов Е.С., Королев А.С., Шейкина О.В. Методика экспресс-оценки плотности древесины в ценопопуляциях сосны обыкновенной // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 202–214. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.202-214

Приведены данные по вариабельности базисной плотности древесины в чистых по составу ценопопуляциях сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.) на территории Республики Марий Эл. Исследования проведены в 2023–2024 годах на 38 объектах в древостоях разного возраста (от 30 до 240 лет), происхождения и условий произрастания. На каждом из них у деревьев измеряли на высоте 1,3 м от корневой шейки диаметр ствола в коре и брали с помощью бурава Пресслера (Haglöf Sweden AB) цилиндрические керны диаметром 5,15 мм и длиной 50 мм. Объем выборки кернов на каждом объекте варьировал от 15 до 130 шт. Цифровой эмпирический материал обработан стандартными методами математической статистики на ПК с использованием пакетов соответствующих прикладных программ. Показано, что для оценки среднего значения плотности древесины, которое может изменяться в ценопопуляциях сосны обыкновенной от 320 до 520 кг·м⁻³, необходимо взять керны у 20–25 средних по размеру деревьев, что обеспечит с вероятностью 99% погрешность не более ± 3%, а для оценки же с погрешностью ± 5% – у 12–15. Минимальное и максимальное значения оцениваемого параметра в каждой ценопопуляции будут составлять соответственно 75 и 140% относительно средней арифметической его величины. Деревья в ценопопуляциях для оценки данного параметра можно отбирать либо регулярно по ходовой линии, либо случайным образом, исключая лишь особи,

резко выделяющиеся по размерам. Базисную плотность древесины целесообразнее оценивать стереометрическим способом, поскольку он по точности не уступает гидростатическому, который более сложен и трудоемок.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, ценопопуляции, древесина, базисная плотность, вариабельность, экспресс-оценка, оптимизация объема выборки.

Demakov Yu.P., Sharapov E.S., Korolev A.S., Sheikina O.V. Rapid assessment of wood density in the Scots pine cenopopulations. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 202–214 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.202-214

The paper presents the data on the variability of wood base density in the pure Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) cenopopulations in the Mari El Republic. The studies were conducted on 38 plots in the stands of different ages (30 to 240 years old), origins and growing conditions in 2023–2024. In each plot, we measured tree trunks with bark and took cylindrical cores of 5.15 mm in diameter and 50 mm in length using a Pressler increment borer (Haglöf Sweden AB). The sample size in each plot varies from 15 to 30 cores. The numeric empirical material was processed by standard methods of mathematical statistics using a PC with packages of relevant applications. It is demonstrated that the assessment of the mean value of wood density, which may vary in the Scots pine cenopopulations from $320 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$ to $520 \text{ kg} \times \text{m}^{-3}$, requires cores from 20 or 25 trees of the average size that would ensure an error of not more than $\pm 3\%$ with a probability of 99%, while for assessment with an error of $\pm 5\%$, it is necessary to take cores from 12 to 15 trees. The minimum and maximum values of the assessed parameter in each cenopopulation will be 75% and 140%, respectively, in relation to the arithmetic mean of its value. To assess this parameter, trees in the cenopopulations may be selected either regularly along the computation line or randomly, except the trees with sharply outstanding sizes. It is more appropriate to assess the base density of wood by a stereometrical method as it provides the accuracy that is not less than that of a hydrostatic method, which is more difficult and time-consuming.

Keywords: Scots pine, coenopopulations, wood; basis density, variability, rapid assessment, sample size optimization.

ДЕМАКОВ Юрий Петрович – профессор кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии Поволжского государственного технологического университета, доктор биологических наук, лауреат Государственной премии Республики Марий Эл. SPIN-код: 1270-0945.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: DemakovYP@volgatech.net

DEMAKOV Yuriy P. – DSc (Biological), Associate Professor, Department of Forest Crops, Breeding and Biotechnology, Volga State University of Technology, Laureate of the State Prize of the Republic of Mari El. SPIN-code: 1270-0945.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: DemakovYP@volgatech.net

ШЕЙКИНА Ольга Викторовна – доцент кафедры лесных культур, селекции и биотехнологии Поволжского государственного технологического университета, доктор биологических наук. SPIN-код: 2215-3308. ORCID: 0000-0002-7507-8588. ResearcherID: AAB-2991-2020. Scopus AuthorID: 57219486493.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: shejkinaov@volgatech.net

SHEIKINA Olga V. – DSc (Biological), Associate Professor, Department of Forest Crops, Breeding and Biotechnology, Volga State University of Technology. SPIN-code: 2215-3308. ORCID: 0000-0002-7507-8588. ResearcherID: AAB-2991-2020. Scopus AuthorID: 57219486493.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: shejkinaov@volgatech.net

ШАРАПОВ Евгений Сергеевич – профессор кафедры строительных конструкций и водоснабжения Поволжского государственного технологического университета, доцент, доктор технических наук. ORCID: 0000-0002-6500-5377. SPIN-код: 9119-8261. ResearcherID: D-7953-2015

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: SharapovES@volgatech.net

SHARAPOV Evgeniy S. – DSc (Technical), Professor, Department of Building Structures and Water Supply, Volga State University of Technology. ORCID: 0000-0002-6500-5377. SPIN-code: 9119-8261. ResearcherID: D-7953-2015

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: SharapovES@volgatech.net

КОРОЛЕВ Александр Сергеевич – старший научный сотрудник департамента научной и международной деятельности, доцент кафедры безопасности жизнедеятельности Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук. ORCID: 0009-0000-1370-1285. SPIN-код: 8836-4618.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Россия. E-mail: KorolevAS@volgatech.net

KOROLEV Alexander S. – PhD (Technical), Senior Researcher Department of scientific and international activities, Associate Professor Department of Emergency Management, Volga State University of Technology. ORCID: 0009-0000-1370-1285. SPIN-code: 8836-4618.

424000. Lenin sq. 3. Yoshkar-Ola. Russia. E-mail: KorolevAS@volgatech.net

Н.А. Демина, О.Н. Тюкавина

ПРИМЕНЕНИЕ СИСТЕМЫ ГЕРБИЦИДОВ ПРИ ВЫРАЩИВАНИИ СЕЯНЦЕВ ЕЛИ В ОТКРЫТОМ ГРУНТЕ

Введение. Одним из важных агротехнических приемов при выращивании хвойных сеянцев в питомниках открытого грунта является борьба с сорной растительностью. Химический метод борьбы с сорным компонентом в лесных питомниках по сравнению с другими наиболее эффективный, позволяющий снижать затраты труда, финансовые вложения, количество агротехнических приемов, улучшать рост сеянцев. Технология эффективного подавления сорных растений предполагает системное применение гербицидов. Борьба с многолетними сорными растениями проводится на паровых полях [Жигунов и др., 2016; Партолина, Егоров, 2017; Якимов и др., 2022], с малолетними и прорастающими из семян многолетними – довсходовым гербицидом, гербицидом по вегетирующим сеянцам. Выбор гербицидов, официально разрешенных к применению в лесном хозяйстве, ограничен. По паре применяются Раундап, Торнадо, Анкор-85 [Гродницкая, Сенашова, 2012; Жигунов и др., 2016; Партолина, Егоров, 2017]; при линейном росте хвойных сеянцев – Зеллек-супер против однодольных, Суперстар против двудольных [Пентелькина, 2012; Егоров, Бубнов, 2013; Бубнов, 2014], в большинстве случаев по одному действующему веществу на конкретный этап в системе применения гербицидов. Ограниченный выбор гербицидов способствует развитию у сорных растений резистентности к ним. Необходимо расширить ассортимент гербицидов для чередования препаратов в процессе выращивания сеянцев путем подбора их аналогов из рекомендованных для сельского хозяйства. В связи с этим вопросы совершенствования химического метода борьбы с сорным компонентом лесных питомников остаются актуальными [Казаков и др., 2019; Стеценко и др., 2019; Бубнов и др., 2022; Тюкавина, Демина, 2022], и одним из направлений является применение смесей гербицидов [Партолина, Егоров, 2017; Партолина, 2018].

Цель работы – оценка эффективности баковых смесей гербицидов в системе ухода за сеянцами.

Материалы и методика исследования. Полевые эксперименты по оценке эффективности современных гербицидов и их баковых смесей проводили в 2022–2023 гг. в Приморском и Виноградовском районах Архангельской области на экспериментальных грядах и в лесном питомнике открытого грунта. Почвы – легкий и средний суглинок.

Выполнено 3 опыта. Повторность опытов пятикратная. Применялись гербициды, зарегистрированные в «Государственном каталоге пестицидов и агрохимикатов, разрешенных к применению на территории Российской Федерации» в 2023 г. и в 2024 г.: Торнадо (д.в. Глифосат, 360 г/л); Анкор-85 (д.в. Сульфометурон-метила кислота, 750 г/кг); Бриг (д.в. Прометрин, 500 г/л); Миура (д.в. Хизалофоп-П-этил, 125 г/л); Мортира (д.в. Трибенурон-метил, 750 г/кг). При подборе гербицидов ориентировались на действующее вещество и доступность препаратов в торговой сети. Выбор дозировок препаратов по действующему веществу (Глифосат, Сульфометурон-метила кислота, Прометрин, Трибенурон-метил) проводили согласно научным работам [Виноградов, 2005; Касимов и др., 2012; Лебедев, 2012; Пентелькина, 2012; Егоров, Бубнов, 2013; Бубнов, 2014; Жигунов и др., 2016]. Концентрация препарата Миура была оценена предварительными исследованиями. Для снижения пестицидного стресса и синергического эффекта добавляли в баковые смеси гербицидов гуминовые кислоты [Панина, Мухамедшин, 2001; Лукаткин и др., 2016] в виде препарата Лигногумат. Биологическую эффективность действия гербицидов на травянистую растительность определяли проективно-количественным методом по снижению проективного покрытия почвы травянистыми видами по отношению к контролю (без обработки) в %.

Гербициды применялись по приведенной ниже схеме.

Опыт 1 заложен 20 августа 2022 г. на участке площадью 36 м², заросшем травянистой растительностью средней высотой 50–60 см с преобладанием однодольных растений. Проведена обработка участка баковой смесью Торнадо (22,5 мл/л) и Анкор-85 (0,75 г/л). Расход рабочей жидкости 200 л/га. Через 3 недели крупные усохшие растения убрали и перекопали участок. 25 мая 2023 г. сформированы гряды и посеяна ель европейская (*Picea abies* (L.) H. Karst.).

Опыт 2 заложен 7 июня 2023 г. в послепосевной период (на 9 день после посева ели европейской). Проведена обработка участка препаратом Бриг (12 мл/л, 250 л/га). Опытные участки размером 1 м² располагались по посевной 6-строчной ленте через 1 м. Площадь обработки 5 м². В период роста сеянцев (26 июля 2023 г.) участок обработан баковой смесью Миура (2 мл/л, 250 л/га) и Мортира (0,08 г/л, 250 л/га). Результат обработки оценен 25 июля 2023 г., 28 августа 2023 г.

Опыт 3 заложен 7 июня 2023 г. в послепосевной период (на 9 день после посева ели европейской). Проведена обработка участка баковой смесью Бриг (12 мл/л, 250 л/га) и Лигногумат (0,25 г/л, 250 л/га). Опытные участки размером 1 м² располагались по посевной 6-строчной ленте через 1 м. Площадь обработки 5 м². В период роста сеянцев (26 июля 2023 г.) участок обработан баковой смесью Миура (2 мл/л, 250 л/га), Мортира (0,08 г/л,

250 л/га) и Лигногумат (0,25 г/л, 250 л/га). Результат обработки оценен 25 июля 2023 г., 28 августа 2023 г. (рис. 1).

Для каждой повторности заложен контрольный участок.

На опытных и контрольных площадках проводили оценку проективно-го покрытия сорной растительности, подсчитывали густоту семян и оценивали их размеры, отмечали процент поврежденности.

Для определения биометрических показателей семян на каждой площадке измеряли штангенциркулем диаметр стволлика у шейки корня с точностью до 0,1 мм; линейкой – высоту сеянца с точностью до 0,1 см.

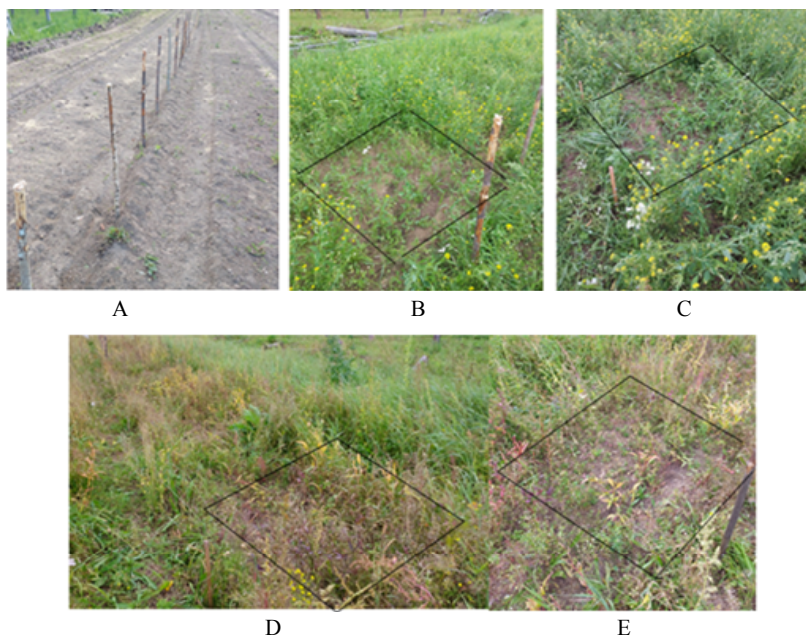


Рис. 1. Опытные варианты по испытанию довсходового гербицида:
А – общий вид опытного участка сразу после высева семян; В – обработанная площадка, Бриг, через 1,5 месяца (26.07.2023); С – обработанный участок, Бриг+Лигногумат (26.07.2023); D – обработанная площадка, Бриг+Лигногумат и Миура+Мортира+Лигногумат (28.08.2023); Е – обработанная площадка, Бриг и Миура+Мортира (28.08.2023)

Fig. 1. Experimental options for testing a pre-emergence herbicide:
А – general view of the experimental site immediately after sowing seeds;
В – treated site of the Brig after 1.5 months (26.07.2023); С – treated site of the Brig+Lignohumate (26.07.2023); D – treated site of the Brig+Lignohumate and Miura+Mortira +Lignohumate (28.08.2023); Е – treated site of the Brig and Miura+ Mortira (28.08.2023)

Результаты исследования. К моменту химической обработки земель, длительное время не подвергавшихся механической обработке, сформировалась луговая растительность, представленная преимущественно однодольными травянистыми растениями (проективное покрытие 0,6–0,8), такими как: тимopheевка луговая (*Phleum pratense* L.), овсяница луговая (*Festuca pratensis* Huds.), мятлик луговой (*Poa pratensis* L.), мятлик обыкновенный (*Poa trivialis* L.), кострец безостый (*Bromopsis inermis* (Leyss.) Holub), полевица гигантская (*Agrostis gigantea* Roth), вейник наземный (*Calamagrostis epigeios* (L.) Roth.), пырей ползучий (*Elytrigia repens* (L.) Nevski), щучка дернистая (*Deschampsia cespitosa* (L.) P. Beauv.), ежа сборная (*Dactylis glomerata* L.). Двудольные растения представлены одуванчиком лекарственным (*Taraxacum officinale* F.H. Wigg.), манжеткой городковатой (*Alchemilla subcrenata* Buser.), лютиком едким (*Ranunculus acris* L.), подорожником большим (*Plantago major* L.), клевером гибридным (*Trifolium hybridum* L.), бодяком полевым (*Cirsium arvense* (L.) Scop.), осотом полевым (*Sonchus arvensis* L.), купырем лесным (*Anthriscus sylvestris* (L.) Hoffm.), мать-и-мачехой обыкновенной (*Tussilago farfara* L.), борщевиком сибирским (*Heracleum sibiricum* L.). Эффективность обработки участка баковой смесью Торнадо и Анкор-85 – 100% (рис. 2).

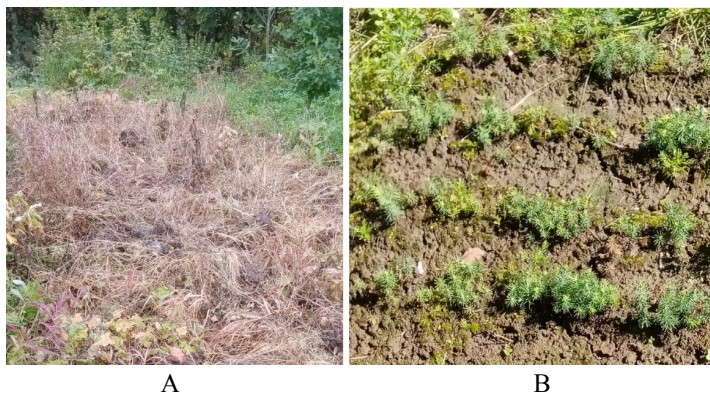


Рис. 2. Эффективность обработки участка баковой смесью Торнадо и Анкор-85: А – участок через 3 недели после обработки (сентябрь 2022); Б – сеянцы ели второго года выращивания (июнь 2024)

Fig. 2. The effectiveness of processing the site with a tank mixture of Tornado and Anchor-85: A – the site 3 weeks after processing (September 2022); B – spruce seedlings of the second year of cultivation (June 2024)

В первый и второй год после обработки данной баковой смесью иной борьбы с сорной растительностью не требуется. При выращивании сеянцев ели на данном участке появляются единично в основном однолетние травянистые растения: яснотка пурпурная (*Lamium purpureum* L.), незабудка полевая (*Myosotis arvensis* (L.) Hill), ясколка костенцовая (*Cerastium holosteoides* Fr.), ромашка безъязычковая (*Matricaria discoidea* DC.), подорожник большой, кипрей железистостебельный (*Epilobium adenocaulon* Hausskn.), мятлик однолетний (*Poa annua* L.).

Следующий опыт заложен в условиях, когда важный элемент агротехники – парование полей – пропущен и, следовательно, борьба с многолетними сорными растениями не проводилась.

Эффективность подавления сорной растительности довсходовым гербицидом Бриг составляет 54%, при этом добавление Лигногумата в баковую смесь значительно не повлияло на результат (табл. 1), но привело к значимому сокращению количества видов с 13 до 10 ($t = 3,0$ при $t_{st} = 2,3$, $p = 0,95$).

Таблица 1

**Эффективность действия гербицидов на сорную растительность
(послепосевная обработка 07.06.2023, обработка
по вегетирующим сеянцам 26.07.2023)**

**The effectiveness of herbicides on weed vegetation (post-sowing treatment
on 06.07.2023, treatment on vegetation seedlings on 07.26.2023)**

Вариант опыта	Дни учета	Проективное покрытие почвы травянистыми растениями/ его снижение к контролю, %		
		общее	однодольные	двудольные
Бриг/ Миура + Мортира	26.07.2023	$\frac{46 \pm 3,8}{54}$	$\frac{5 \pm 1,5}{78}$	$\frac{39 \pm 3,1}{50}$
	28.08.2023	$\frac{20 \pm 2,4}{80}$	$\frac{0 \pm 0}{100}$	$\frac{18 \pm 2,2}{77}$
	25.06.2024	$\frac{45 \pm 4,9}{55}$	$\frac{4 \pm 1,2}{93}$	$\frac{40 \pm 5,7}{11}$
Бриг+Лигногумат/ Миура + Мортира + Лигногумат	26.07.2023	$\frac{41 \pm 3,1}{60}$	$\frac{4 \pm 1,4}{83}$	$\frac{35 \pm 2,7}{55}$
	28.08.2023	$\frac{33 \pm 5,8}{67}$	$\frac{0 \pm 0}{100}$	$\frac{31 \pm 4,2}{60}$
	25.06.2024	$\frac{45 \pm 2,7}{55}$	$\frac{3 \pm 1,7}{95}$	$\frac{41 \pm 0,6}{10}$

Наибольшая эффективность действия препарата проявилась против од-
нолетних (81%). Чувствительными к обработке довсходовым гербицидом
Бриг и баковой смесью Бриг и Лигногумат видами сорных растений являются
пырей ползучий, желтушник левкойный (*Erysimum cheiranthoides* L.), пас-
тушья сумка обыкновенная (*Capsella bursa-pastoris* (L.) Medik.), звездчатка
злаковидная (*Stellaria graminea* L.); устойчивыми – фиалка полевая (*Viola*
arvensis Murray.), горец почечуйный (*Persicaria maculosa* S.F. Gray.), хвощ по-
левой (*Equisetum arvense* L.), лапчатка гусиная (*Potentilla anserina* L.), тысяче-
листник обыкновенный (*Achillea millefolium* L.), подорожник ланцетный
(*Plantago lanceolata* L.), щавелек обыкновенный (*Rumex acetosella* L.), марь
белая (*Chenopodium album* L.). Среди сорной растительности доминировали
однолетние виды. Добавление Лигногумата в баковую смесь при обработке
Бригом значимо не повлияло на распределение сорных растений по биологи-
ческим группам после обработки. Отмечается тенденция лучшего подавления
многолетних сорных растений, хорошо размножающихся вегетативными ор-
ганами, Бригом без добавления Лигногумата, но баковая смесь Бриг и Лигно-
гумат приводит к большему снижению проективного покрытия однолетних и
двулетних растений (табл. 2).

Таблица 2

Распределение сорных растений по биологическим группам
Distribution of weeds by biological groups

Вариант опыта	Агробиологическая группа	Даты учета		
		26.07.2023	28.08.2023	25.06.2024
Бриг/ Миура+ Мортира	Многолетние, слабо или совсем не размножающиеся вегетативным путем	<u>3±0,6*</u> 52	<u>3±1,0</u> 53	<u>18±6,0</u> -8
	Многолетние, хорошо размножаю- щиеся вегетативными органами	<u>13±2,9</u> 70	<u>7±1,6</u> 84	<u>24±3,5</u> 71
	Малолетние	<u>30±3,6</u> 45	<u>10±1,2</u> 79	<u>3±0,6</u> -40
Бриг+ Лигногумат/ Миура+ Мортира+ Лигногумат	Многолетние, слабо или совсем не размножающиеся вегетативным путем	<u>4±1,7</u> 30	<u>4±1,7</u> 37	<u>22±5,8</u> -32
	Многолетние, хорошо размножаю- щиеся вегетативными органами	<u>17±3,4</u> 57	<u>6±1,3</u> 86	<u>20±6,3</u> 76
	Малолетние	<u>20±3,1</u> 63	<u>23±2,6</u> 57	<u>4±1,4</u> -85

Примечание. * Проективное покрытие почвы растениями/ его снижение относи-
тельно к контролю, %.

Эффективность подавления сорной растительности баковой смесью гербицидов Миура и Мортира, применяемой по вегетирующим сеянцам, составляет 56% относительно проективного покрытия сорной растительности до обработки. После обработки количество видов на площадке сократилось до 6. Добавление Лигногумата в баковую смесь значительно не повлияло на результат (табл. 1), но отмечается тенденция большей эффективности баковой смеси без Лигногумата. При сравнении с проективным покрытием до обработки баковой смесью гербицидов, применяемых при вегетации сеянцев, без Лигногумата в баковой смеси проективное покрытие значительно сокращается в 2,3 раза ($t = 5,8$ при $t_{st} = 3,4$, $p = 0,99$), а с добавлением Лигногумата – на 8% ($t = 1,2$ при $t_{st} = 2,3$, $p = 0,95$). Такой эффект происходит в связи с активным заселением освободившейся территории однодольными растениями (фиалка полевая, торица полевая (*Spergula arvensis* L.), пастушья сумка обыкновенная, горец почечуйный), и быстрым восстановлением наземной фитомассы многолетними сорными растениями (тысячелистник обыкновенный, подорожник ланцетный, подмаренник мягкий (*Galium mollugo* L.), василек скабиозовый (*Centaurea scabiosa* L.)). В результате обработки баковой смесью гербицидов однодольные растения погибли. Чувствительными к обработке баковой смесью гербицидов Миура и Мортира и баковой смесью Миура, Мортира и Лигногумат видами сорных растений являются фиалка полевая, гречишка вьюнковая (*Fallopia convolvulus* (L.) Á. Löve.), пырей ползучий, желтушник левкойный, тысячелистник обыкновенный, пастушья сумка обыкновенная, звездчатка злаковидная, щавелек обыкновенный, марь белая, одуванчик лекарственный, осот полевой, пикульник двенадцезантый (*Galeopsis bifida* Boenn.), горошек мышиный (*Vicia cracca* L.), горец почечуйный, подмаренник мягкий, василек скабиозовый; устойчивыми с изменением окраски, деформацией – хвощ полевой, льнянка обыкновенная (*Linaria vulgaris* Mill.), лапчатка гусиная, подорожник ланцетный. При снижении проективного покрытия сорных трав после обработки баковой смесью гербицидов активно разрастается фиалка полевая.

В следующий вегетационный период после обработки гербицидами сохраняется общая закономерность сукцессионного развития травяного покрова после механической обработки почв: происходит увеличение проективного покрытия многолетних, хорошо размножающихся вегетативными органами растений, вытесняющих малолетние растения. Но при обработке гербицидами этот процесс замедляется и покрытие территории малолетними растениями превышает контроль.

Добавление к довсходовому гербициду Бриг Лигногумата не повлияло на всхожесть семян (табл. 3). Причем всхожесть ели на опытных площадках значимо не отличается от контроля, но отмечается тенденция к ее увеличению.

Таблица 3

Фитотоксичность гербицида
Phytotoxicity of the herbicide

Вариант опыта	Количество здоровых семян после довсходовой обработки (26.07.2023), шт./м ²	Характеристика семян после обработки при линейном росте ели (28.08.2023)		
		количество семян, шт./ м ²	поврежденность, %	высота, см
Бриг/Миура+Мортира	<u>30,4±3,5*</u> 105	<u>32,7±3,2</u> 121	<u>7,2±1,1</u> 30	<u>2,0±0,05</u> 123
Бриг+Лигногумат/Миура+Мортира+Лигногумат	<u>30,5±0,7</u> 105	<u>40,0±2,0</u> 148	<u>4,0±0,5</u> 17	<u>2,2±0,04</u> 135

Примечание. * абсолютные значения/процент относительно контроля, %.

Добавление к баковой смеси гербицидов Миура и Мортира Лигногумата значимо не повлияло на количество семян, но отмечается тенденция к увеличению их густоты при добавлении Лигногумата и значимое увеличение количества семян по сравнению с контролем в 1,5 раза ($t = 4,6$ при $t_{st} = 3,4$, $p = 0,99$). Добавление Лигногумата к баковой смеси гербицидов Миура и Мортира способствовало значимому снижению поврежденности семян в 1,8 раза ($t = 2,6$ при $t_{st} = 2,3$, $p = 0,95$) и увеличению высоты семян на 10% ($t = 3,1$ при $t_{st} = 2,3$, $p = 0,95$).

Выводы:

1. Эффективность баковой смеси гербицидов Торнадо (360 г/л) и Анкор-85 (750 г/кг) по луговой растительности составляет 100%. После обработки данной баковой смесью гербицидов на следующий вегетационный период не требуются дополнительные приемы борьбы с сорной растительностью на первом году выращивания семян ели;
2. Эффективность подавления сорной растительности довсходовым гербицидом Бриг составляет 54%. Добавление Лигногумата значимо не влияет на эффективность гербицида;
3. Эффективность подавления сорной растительности при системе применения гербицидов: довсходовый – Бриг; при линейном росте семян –

Миура и Мортира – составляет 80%. Добавление Лигногумата снижает эффективность баковой смеси;

4. Добавление Лигногумата к баковой смеси гербицидов Миура и Мортира способствовало снижению поврежденности сеянцев в 1,8 раза.

Сведения о финансировании исследования. Работа подготовлена по результатам исследований, выполненных в рамках государственного задания ФБУ «СевНИИЛХ» на проведение прикладных научных исследований. Регистрационный номер темы 122020100292-5.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бубнов А.А. Система гербицидов при выращивании однолетних сеянцев ели и сосны в питомниках открытого грунта // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2014. № 3. С. 36–42.

Бубнов А.А., Егоров А.Б., Павлюченкова Л.Н., Постников А.М. Экологическая оценка гербицидов, используемых при лесовыращивании // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2022. № 4. С. 58-75. DOI: 10.21178/2079-6080.2022.4.58.

Виноградов А.Н. Комплексное применение экологически безопасных средств химии при выращивании сеянцев и культур сосны обыкновенной на дерново-подзолистых, супесчаных и среднесуглинистых окультуренных почвах центрального района европейской части России: автореф. дисс. ... канд. с.-х. наук. М.: Московский государственный университет леса, 2005. 25 с.

Гродницкая И.Д., Сенашова В.А. Новое для лесопитомников Сибири заболевание сеянцев сосны обыкновенной // Защита и карантин растений. 2012. № 2. С. 48–50.

Егоров А.Б., Бубнов А.А. Система гербицидов для ухода за посевами хвойных пород в лесных питомниках // ИВУЗ. «Лесной журнал». 2013. №5. С. 71–77.

Жигунов А.В., Соколов А.И., Харитонов В.А. Выращивание посадочного материала с закрытой корневой системой в Устьянском тепличном комплексе. Практические рекомендации. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2016. 43 с.

Казаков В.И., Проказин Н.Е., Казаков И.В., Лобанова Е.Н. Эффективность контактного нанесения гербицидов для борьбы с сорной растительностью в лесных питомниках // Лесотехнический журнал. 2019. Том 9. № 1 (33). С. 153–159. DOI: 10.12737/article_5c920170d50c89.62305424

Касимов А.К., Соколов Р.А., Бердинских С.Ю., Шабанова Е.Е. Влияние гербицидов на сохранность и развитие сеянцев ели европейской (*Picea abies*) в лесном питомнике Южнотаежного Предуралья // Аграрный вестник Урала. 2012. № 3(95). С. 37–39.

Лебедев Е.В. Влияние гербицида Гезагарда (прометрина) на сеянцы ливневницы сибирской в условиях серых лесных почв центральной части Нижегородской области // Известия Оренбургского государственного аграрного университета. 2012. № 1 (33). С. 23–26.

Лукашкин А.С., Семенова А.С., Лукашкин А.А. Влияние регуляторов роста на проявления токсического действия гербицидов на растения // Агрохимия. 2016. № 1. С. 73–95.

Панина Н.Б., Мухамедшин К.Д. Интенсификация лесовыращивания с использованием комплекса экологически безопасных средств химии // Лесной вестник. 2001. № 2. С. 71–75.

Партолина А.Н. Инновационный подход в применении баковых смесей гербицидов с синергическим эффектом при лесовосстановлении хвойных пород // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2018. № 3-4. С. 42–53. DOI: 10.21178/2079–6080.2018.3-4.42.

Партолина А.Н., Егоров А.Б. Борьба с сорной растительностью в лесных питомниках и перед созданием лесных культур с применением смесей современных гербицидов // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2017. № 3. С. 36–46.

Пентелькина Н.В. Проблемы выращивания посадочного материала в лесных питомниках и пути их решения // Актуальные проблемы лесного комплекса. 2012. № 31. С. 189–193.

Стеценко С.К., Андреева Е.М., Терехов Г.Г., Хуришайнен Т.В., Кучин А.В. О регламенте совместного применения стимуляторов роста и пестицидов в лесовыращивании // Экология и промышленность России. 2019. Т. 23. № 1. С. 66–71. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-66-71.

Тюкавина О.Н., Демина Н.А. Применение гербицидов при выращивании сеянцев хвойных в питомниках открытого грунта // Хвойные бореальной зоны. 2022. Т. 40. № 6. С. 513–518. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-513-518.

Якимов Н.И., Гвоздев В.К., Крук Н.К. Лесные культуры: методические рекомендации по выполнению курсового проекта. Минск: БГТУ, 2022. 52 с.

References

Bubnov A.A. The system of herbicides at a cultivation of spruce and pine annual seedlings in field nurseries. *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry*, 2014, no. 3, pp. 36–42. (In Russ.)

Bubnov A.A., Egorov A.B., Pavlyuchenkova L.N., Postnikov A.M. Ecological evaluation of herbicide application in forest cultivation. *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry*, 2022, no. 4, pp. 58–75. DOI: 10.21178/2079-6080.2022.4.58. (In Russ.)

Egorov A.B., Bubnov A.A. The System of Herbicides for Protection of Coniferous Crops in Forest Nurseries. *Russian Forestry Journal*, 2013, no. 5, pp. 71–77. (In Russ.)

Grodnitskaya I.D., Senashova V.A. A disease of seedlings of scots pine new for forest nurseries in Siberia. *Protection and quarantine of plants*, 2012, no. 2, pp. 48–50. (In Russ.)

Kasimov A.K., Sokolov R.A., Berdinskikh S.Yu., Shabanova E.E. The influence of herbicides on the preservation and development of seedlings of European spruce (*Picea abies*) in the forest nursery of the Southern Taiga Urals. *Agrarian Bulletin of the Urals*, 2012, no. 3(95), pp. 37–39. (In Russ.)

Kazakov V.I., Prokazin N.E., Kazakov V., Lobanova E.N. Efficiency of herbicides contact application to fight against weeds in forest nursery. *Forestry journal*, 2019, vol. 9, no. 1 (33), pp. 153–159. DOI: 10.12737/article_5c920170d50c89.62305424 (In Russ.)

Lebedev E.V. The effect of the herbicide Gezagard (promethrin) on seedlings of Siberian larch in the conditions of gray forest soils in the central part of the Nizhny Novgorod region. *Proceedings of the Orenburg State Agrarian University*, 2012, no. 1 (33), pp. 23–26. (In Russ.)

Lukatkin A.S., Semenova A.S., Lukatkin A.A. The influence of growth regulators on the existence of toxic effect of herbicides on plants. *Agrochemistry*, 2016, no. 1, pp. 73–95. (In Russ.)

Panina N.B., Mukhamedshin K.D. Intensification of forest cultivation using a complex of environmentally friendly chemicals. *Forestry Bulletin*, 2001, no. 2, pp. 71–75. (In Russ.)

Partolina A.N. The innovative approach to the application of tank mixtures of herbicides with synergistic effect at reforestation of coniferous species. *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry*, 2018, no. 3-4, pp. 42–53. DOI: 10.21178/2079–6080.2018.3-4.42. (In Russ.)

Partolina A.N., Egorov A.B. The weed control in forest nurseries and in the establishment of forest cultures with the use of mixtures of modern herbicides. *Proceedings of the St. Petersburg Scientific Research Institute of Forestry*, 2017, no. 3, pp. 36–46. (In Russ.)

Pentelkina N.V. Problems of growing planting material in forest nurseries and ways to solve them. *Actual problems of the forest complex*, 2012, no. 31, pp. 189–193. (In Russ.)

Stetsenko S.K., Andreeva E.M., Terekhov G.G., Hurshkainen T.V., Kuchin A.V. On the Regulation of the Joint Use of Growth Stimulants and Pesticides in Forest Growing. *Ecology and industry of Russia*, 2019, vol. 23, no. 1, pp. 66–71. DOI: 10.18412/1816-0395-2019-1-66-71. (In Russ.)

Tyukavina O.N., Demina N.A. The use of herbicides in the cultivation of coniferous seedlings in open ground nurseries. *Coniferous trees of the boreal zone*, 2022, vol. 40, no. 6, pp. 513–518. DOI: 10.53374/1993-0135-2022-6-513-518. (In Russ.)

Vinogradov A.N. Complex application of environmentally friendly chemicals in the cultivation of seedlings and crops of Scots pine on sod-podzolic, sandy loam and

medium loamy cultivated soils of the central region of the european part of Russia: the author's abstract. Diss. ... Candidate of Agricultural Sciences. M.: Moscow State University of Forestry, 2005. 25 p. (In Russ.)

Yakimov N.I., Gvozdev V.K., Kruk N.K. Forest crops: methodological recommendations for the implementation of the course project. Minsk: BSTU, 2022. 52 p. (In Russ.)

Zhigunov A.V., Sokolov A.I., Kharitonov V.A. Cultivation of planting material with a closed root system in the Ustyansk greenhouse complex. Practical recommendations. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2016. 43 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 30.07.2024

Демина Н.А., Тюкавина О.Н. Применение системы гербицидов при выращивании сеянцев ели в открытом грунте // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 215–228. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.215-228

Лесовосстановление связано с выращиванием посадочного материала. Эффективным решением для борьбы с сорными растениями в лесных питомниках является применение гербицидов. Перечень химических препаратов для борьбы с сорными растениями, рекомендованный для лесного хозяйства, ограничен. На каждый этап борьбы с нежелательной растительностью приходится по одному действующему веществу, что способствует развитию резистентности у сорных растений. Целью работы является оценка эффективности баковых смесей гербицидов в системе ухода за сеянцами ели. Полевые эксперименты по оценке эффективности современных гербицидов и их баковых смесей проводили в Приморском и Виноградовском районах Архангельской области на экспериментальных грядках и в лесном питомнике открытого грунта. Почвы – легкий и средний суглинок. При подборе гербицидов ориентировались на действующее вещество, апробированное учеными и разрешенное на территории РФ, и доступность препаратов в торговой сети. Эффективность баковой смеси гербицидов Торнадо и Анкор-85 по луговой растительности составляет 100%. После обработки данной баковой смесью гербицидов на следующий вегетационный период не требуются дополнительные приемы борьбы с сорной растительностью на первом году выращивания сеянцев ели. Эффективность подавления сорной растительности довсходовым гербицидом Бриг составляет 54%. Добавление Лигногумата значимо не влияет на эффективность гербицида. Эффективность подавления сорной растительности при системе применения гербицидов: довсходовый – Бриг; при линейном росте сеянцев – Миура и Мортира – составляет 70%. Добавление Лигногумата снижает эффективность

баковой смеси. Добавление Лигногумата к баковой смеси гербицидов Миура и Мортира способствовало снижению поврежденности семян в 1,8 раза.

Ключевые слова: гербициды, сорная растительность, питомник, семена, ель.

Demina N.A., Tyukavina O.N. Application of the herbicide system in the cultivation of spruce seedlings in the open ground. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 215–228 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.215-228

Reforestation is associated with the cultivation of planting material. An effective solution to weed control in forest nurseries is the use of herbicides. The list of chemicals for weed control recommended for forestry is limited. There is one active ingredient for each stage of the fight against unwanted vegetation, which contributes to the development of resistance in weeds. The aim of the work is to evaluate the effectiveness of tank mixtures of herbicides in the care system for spruce seedlings. Field experiments to evaluate the effectiveness of modern herbicides and their tank mixtures were carried out in the Primorsky and Vinogradovsky districts of the Arkhangelsk region on experimental ridges and in an open-ground forest nursery. The soils are light to medium loam. When selecting herbicides, we focused on the active substance tested by scientists and allowed in the territory of the Russian Federation, and the availability of drugs in the retail network. The effectiveness of the tank mixture of Tornado and Ankor-85 herbicides on meadow vegetation is 100%. After treatment with this tank mixture of herbicides for the next growing season, additional methods of weed control are not required in the first year of growing spruce seedlings. The effectiveness of weed suppression with the pre-emergence herbicide Brig is 54%. The addition of Lignohumate does not significantly affect the effectiveness of the herbicide. The effectiveness of weed suppression in the system of application of herbicides: preemergence – Brig; with linear growth of seedlings – Miura and Mortira – is 70%. The addition of lignohumate reduces the effectiveness of the tank mixture. The addition of Lignohumate to the tank mixture of Miura and Mortira herbicides contributed to a 1.8-fold reduction in damage to seedlings.

Keywords: herbicides, weed vegetation, nursery, seedlings, spruce.

ТЮКАВИНА Ольга Николаевна – ведущий научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства; профессор кафедры биологии, экологии и биотехнологии Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор сельскохозяйственных наук, доцент. Reasearcher ID: H-2336-2019. ORCID: 0000-0003-4024-6833. SPIN-код: 5120-2525.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: o.tukavina@narfu.ru

TYUKAVINA Olga N. – DSc (Agriculture), Leading Researcher of the Northern Research Institute of Forestry; Professor of the Department of Biology, Ecology and Biotechnology of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov, Associate Professor, Reasearcher ID: H-2336-2019. ORCID: 0000-0003-4024-6833. SPIN-code: 5120-2525.

163002, Severnaya Dvina emb. 13, Arkhangelsk, Russia. E-mail: o.tukavina@narfu.ru

ДЕМИНА Надежда Александровна – старший научный сотрудник Северного научно-исследовательского института лесного хозяйства, кандидат сельскохозяйственных наук, доцент. Reasearcher ID: AAD-2782-2021. ORCID: 0000-0001-5626-1523. SPIN-код: 8551-7912.

163062, ул. Никитова, д. 13, г. Архангельск, Россия. E-mail: monitoringlesov@sevniilh-arh.ru

DEMINA Nadezhda A. – PhD (Agriculture), Senior Research Associate of the Northern Research Institute of Forestry. Reasearcher ID: AAD-2782-2021. ORCID: 0000-0001-5626-1523. SPIN-code: 8551-7912.

163062, Nikitova str. 13, Arkhangelsk, Russia. E-mail: monitoringlesov@sevniilh-arh.ru

**В.А. Волков, Д.С. Каржаев, Е.Д. Сафронычева, М.В. Тис,
К.В. Чухланцева, В.В. Шаршавикова, Е.К. Потокина**

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ KASP- И HRM-МАРКЕРОВ
ДЛЯ ВЫЯВЛЕНИЯ ПОЛИМОРФИЗМОВ,
ВЛИЯЮЩИХ НА АДАПТИВНЫЕ ПРИЗНАКИ СОСНЫ И ЕЛИ**

Введение. Глобальное изменение климата оказывает значительное влияние на лесные экосистемы, особенно на хвойные лесообразующие породы [Королева и др., 2015]. Повышение температуры в ближайшие годы будет существенно затрагивать физиологические процессы роста древесных пород, особенно вечнозеленых видов, таких как ель и сосна [Way, Open, 2010]. В России прогнозируется изменение растительных сообществ на 70% площадей сосняков и 50% ельников, что требует пересмотра подходов к лесовосстановлению и селекции [Королева и др., 2015].

Существующая система ДНК-скрининга лесных генетических ресурсов, используемая сегодня для инвентаризации и паспортизации разнообразия лесных генетических ресурсов РФ, может и должна быть дополнена функциональными молекулярными маркерами генов, контролирующими важнейшие адаптивные признаки основных лесообразующих пород.

Известно, что изменчивость важнейших приспособительных признаков хвойных лесообразователей контролируется генетически. Так, например, сроки распускания почек у ели сизой (*Picea glauca* (Moench) Voss) на 44-83% обусловлены генотипом [Rweyongeza et al., 2010]. Однако идентификация соответствующих генов или картирование QTL (Quantitative Trait Loci) классическим способом – путем скрещивания и создания картирующих популяций – чрезвычайно затруднена у древесных пород. В такой ситуации на помощь приходят методы «обратной» генетики, главный принцип которой – от гена к признаку (фенотипу).

Сегодня в научной литературе накоплена обширная информация о генах-кандидатах, полиморфизм которых ассоциирован с внутривидовой изменчивостью деревьев по фенологическим ритмам, годичным приростам, продолжительности вегетационного периода, устойчивости к абиотическим факторам. В большинстве случаев эти гены были идентифицированы как «кандидаты» на основании их хорошо изученной функции у

модельных видов, например, у арабидопсиса. Функциональность выбранных генов у ели и сосны доказывается тем фактом, что частота встречаемости их аллелей в популяциях лесообразующих пород демонстрирует четко выраженный географический клин в широтном направлении [Chen et al., 2012, 2014; Kujala, Savolainen, 2012; Ranade, García-Gil, 2023]. Это свидетельствует о ключевой роли этих генов в формировании адаптивной реакции основных лесообразователей. Формирование такого «широтного клина» также говорит о том, что аллельный полиморфизм генов-кандидатов находится под давлением естественного отбора и при формировании искусственных насаждений лесных пород лучше использовать генотипы, которые в данных конкретных условиях имеют преимущество при выживании.

Молекулярное маркирование генов-кандидатов, контролирующих важные приспособительные признаки, потенциально позволяет выявлять деревья, генетически наиболее адаптированные к изменяющемуся климату, и использовать их семенное потомство для закладки лесных культур в регионах, для которых в ближайшей перспективе прогнозируется существенное изменение климатических условий. Это может значительно повысить эффективность лесовосстановительных программ.

Цели и задачи. Целью исследования являлась разработка методов для массового скрининга аллельного полиморфизма генов, вовлеченных в формирование адаптивных признаков ели и сосны.

Методика исследования. В рамках нашего исследования для генотипирования были выбраны гены-кандидаты, связанные с адаптивными признаками у ели и сосны. В перечень, составленный по литературным данным, были включены гены фотопериодической реакции *pseudo-response regulators* (PRR1, PRR7) а также гены фоторецепторов, кодирующие фитохромы (PhyO) и криптохромы (CRY1) [Chen et al., 2012; Kujala, Savolainen, 2012; Ranade, García-Gil, 2023].

Для всех перечисленных генов на подготовительном этапе были сконструированы праймеры и с их использованием получены ПЦР-продукты ожидаемого размера, предназначенные для последующего секвенирования по Сэнгеру с использованием генетического анализатора Applied Biosystems 3500. Секвенирование проводили с использованием набора NimaGen BrilliantDye Terminator, v 3.1 в соответствии с протоколом производителя. Перечень праймеров, использованных для секвенирования, представлен в табл. 1.

Таблица 1

**Праймеры для амплификации последовательностей генов-кандидатов
с последующим секвенированием по Сэнгеру**

**Primers for amplification of candidate gene sequences followed
by Sanger sequencing**

Название	Температура отжига, °C	Последовательность	Источник
CRY1_F	55	CTGGGTTCCAACATCCACTAC	[Ranade, García-Gil, 2023]
CRY1_R	55	GGTACAATGCCTCCACTACTC	
PhyO_F	56	GGAGAAGGGACCAGTTGTTT	[Ranade, García-Gil, 2023]
PhyO_R	56	TCCTGCCGAATGTATGCTAAT	
PRR1_F	56	ACTCCAATACCAACAGTACCAA	[Kujala, Savolainen, 2012]
PRR1_R	56	ATATGTGAGGAAAGCTGATGC	
PRR7_F	55	CCAGAGATTGCCAGGACAAA	[Chen et al., 2012]
PRR7_R	55	AGCATGGTCTTAGATGGAAAGG	

В результате секвенирования последовательностей этих генов-кандидатов на выборке из 20 деревьев ели и 20 деревьев сосны лесных культур Дружносельского лесничества (Ленинградская область) были обнаружены однонуклеотидные полиморфизмы (SNP) в следующих генах: у ели – *PhyO*, *CRY1*; у сосны – *PRR1*, *PRR7*. Ниже приводим описания выявленного полиморфизма.

Ген PhyO (NCBI Acc. № U60264.1, PlantGenIE Acc. № MA_6809).

В экзоне 4 гена *PhyO* в результате секвенирования обнаружен SNP, ранее описанный в популяциях ели европейской из Швеции [Ranade, García-Gil, 2023]. В указанной публикации сообщалось о корреляции частоты встречаемости аллелей этого гена с географической широтой места произрастания популяции, и, соответственно, с изменением длины светового дня и соотношением различных длин волн красного света [Ranade, García-Gil, 2021; Ranade, García-Gil, 2023]. Мутация (A/G) является функциональной (несинонимичный SNP), она изменяет структуру кодируемого белка вследствие аминокислотной замены (аспаргин/серин) (рис. 1).

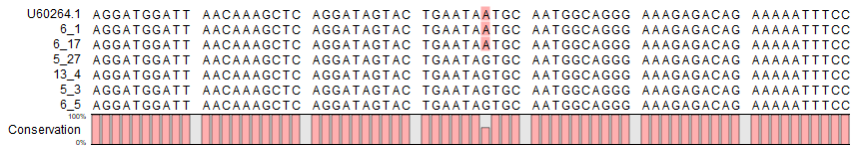


Рис. 1. Полиморфизм (SNP A/G), выявленный у ели европейской в гене *PhyO*

Fig. 1. Polymorphism (SNP A/G) identified in the *PhyO* gene of Norway spruce

Ген *CRY1* (NCBI Acc.№ KF144048.1, PlantGenIE Acc.№ MA_10428291g0010).

На материале исследованной выборки елей из Дружносельского лесничества был обнаружен SNP в экзоне 4 гена *CRY1*. Выявлен аллель, альтернативный по отношению к опубликованной в NCBI последовательности и ранее не описанный в литературных источниках. Найденный полиморфизм приводит к изменению структуры кодируемого белка, изменяя пролин на аланин (рис. 2).

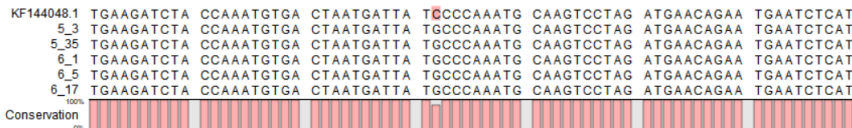


Рис. 2. Полиморфизм (SNP C/G), выявленный у ели европейской в гене *CRY1*

Fig. 2. Polymorphism (SNP C/G) identified in the *CRY1* gene of Norway spruce

Ген *PRR1* (NCBI Acc. № JQ969545.1).

При исследовании последовательности гена *PRR1* на выборке сосны обыкновенной был обнаружен SNP, локализованный в интроне 4 (рис. 3).

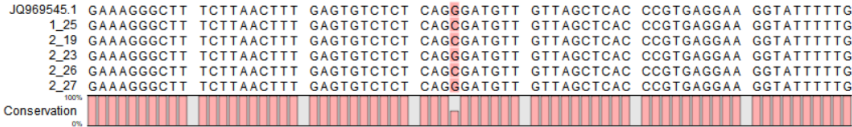


Рис. 3. Полиморфизм (SNP G/C), выявленный у сосны обыкновенной в гене *PRR1*

Fig. 3. Polymorphism (SNP G/C) identified in the *PRR1* gene of Scots pine

Ген PRR7 (NCBI Acc. № JQ969545.1).

Последовательность участка гена *PRR7*, полученная при секвенировании выборки сосны обыкновенной, была выровнена на референсную гомологичную последовательность генома *Pinus taeda* L. В результате выявлен SNP (G/A) (рис. 4), однако установить, находится ли этот SNP в кодирующем участке ДНК, не удалось по причине отсутствия в базах данных последовательностей к ДНК.

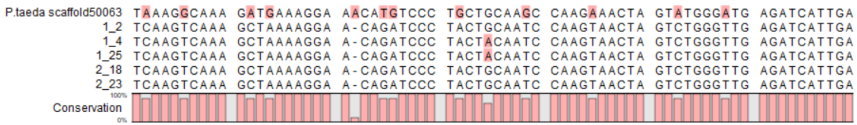


Рис. 4. Полиморфизм (SNP G/A), выявленный у сосны обыкновенной гене *PRR7*

Fig. 4. Polymorphism (SNP G/A) identified in the PRR7 gene of Scots pine

Разработка метода массового скрининга.

Для разработки метода массового скрининга, позволяющего выявлять мутации у анализируемых деревьев без применения дорогостоящего и трудоемкого метода секвенирования, мы использовали тестовую выборку из 100 генотипов ели и 100 генотипов сосны, собранных на объекте лесных культур ели и сосны в квартале 81 Дружносельского лесничества Ленинградской области.

В качестве объектов для молекулярного маркирования были использованы полиморфизмы, выявленные путем секвенирования и описанные выше.

ДНК выделяли из замороженной хвои с помощью СТАВ-метода [Rahimah et al. 2006]. Чистоту и концентрацию выделенной ДНК определяли с помощью спектрофотометра SPECTROstar Nano (BMG Labtech, Германия). Для проведения анализа отбиралась ДНК с соотношением поглощения (A260/280) от 1,8 до 2. Выделенная ДНК разводилась до концентрации 100 нг/мкл.

Для каждого гена-кандидата были разработаны специфические праймеры, фланкирующие однонуклеотидные полиморфизмы (SNP), подлежащие анализу (табл. 2). Секвенирование ПЦР-продуктов с использованием анализатора Applied Biosystems 3500 позволило выявить полиморфизмы в генах *PhyO* и *CRY1* у ели и в генах *PRR1* и *PRR7* у сосны. В качестве методов массового скрининга использовались два метода генотипирования: HRM (High Resolution Melting) и KASP (Kompetitive Allele Specific PCR) – что обеспечивало надежность и точность выявления SNP в генах-кандидатах.

Таблица 2

Последовательности праймеров для выявления полиморфизма методом HRM и KASP

Primer sequences for polymorphism detection using HRM and KASP methods

Ген	Метод	Название праймера	Последовательность праймера
PhyO (ель)	HRM	Pa_PhyO_HRM_F	GCCAACTCAAAGGTCAGGAT
		Pa_PhyO_HRM_R	CTGTCTCTTTCCCTGCCATT
CRY1 (ель)	HRM	Pa_CRY1_HRM_F	GAAGATCTACCAAATGTGACTAATG
		Pa_CRY1_HRM_R	ATCTCGCCCTCTCAAGATAC
PRR1 (сосна)	HRM	Ps_PRR1_HRM_F	TGCGGTAAGGTATGAGAAAGG
		Ps_PRR1_HRM_R	GTTGAATGCTAAGGATGCGTAAA
PRR7 (сосна)	HRM	Ps_PRR7_HRM_F	GGGAAAGGTAACAACCAGGAA
		Ps_PRR7_HRM_R	CTTGGATTGCAGTAGGGATCTG
PhyO (ель)	KASP	PhyO_KASP_F (аллель X)	CTGTCTCTTTCCCTGCCATTGCAT
		PhyO_KASP_Y (аллель Y)	TGTCTCTTTCCCTGCCATTGCAC
		PhyO_KASP_Common	GGATTAACAAAGCTCAGGATAGTACTGAA
CRY1 (ель)	KASP	CRY1_KASP_F (аллель X)	AAGATCTACCAAATGTGACTAATGATTATC
		CRY1_KASP_Y (аллель Y)	AAGATCTACCAAATGTGACTAATGATTATG
		CRY1_KASP_Common	GATTCATTCTGTTTCATCTAGGACTTGCAT

HRM-анализ.

Для выявления SNP методом HRM были разработаны праймеры, последовательности которых приведены в табл. 2. Реакции проводились на системе CFX96 Touch (Bio-Rad, США) с использованием реактивов от компании «Евроген». В реакционную смесь добавляли SYBR Green I (PB025S) для флуоресцентной детекции. Стандартная программа амплификации включала начальную денатурацию при 95 °C в течение 2 минут,

затем 35 циклов, состоящих из денатурации при 95 °С на 20 секунд, отжига праймеров при температуре 52 °С на 30 секунд и элонгации при 72 °С на 30 секунд. Анализ кривых плавления проводился в диапазоне 70–95 °С с шагом 0,1 °С, что позволяло надежно различать образцы с гомо- и гетерозиготными генотипами.

KASP-анализ.

KASP-генотипирование проводилось с использованием аллель-специфичных праймеров и FRET-кассет с красителями FAM и HEX, которые позволяли дифференцировать аллели по интенсивности свечения. Реакции проводились на приборе CFX96 (Bio-Rad, США), следуя протоколу производителя. В ходе оптимизации протокола были внесены коррективы: для обеспечения четкой кластеризации образцов повышали температуру до 68 °С и увеличивали количество циклов до 36. Программа амплификации включала начальную денатурацию при 94 °С в течение 15 минут, далее 10 циклов с понижением температуры отжига с 68 °С до 62 °С и финальную стадию из 30 циклов при температуре 62 °С.

Результаты исследования. Различия в эффективности HRM и KASP для различных генов подчеркивают необходимость выбора подходящего метода генотипирования с учетом характеристики каждого конкретного гена-кандидата. Для выявления аллельных вариантов, ассоциированных с ключевыми адаптивными признаками, такими как устойчивость к абиотическим стрессам и сроки наступления фенологических фаз, KASP-маркеры продемонстрировали самую высокую точность. HRM, в свою очередь, оказался наименее затратным методом, однако потребовал значительных усилий по оптимизации условий проведения экспериментов.

В результате успешно проведенной апробации на тестовых выборках для скрининга массового материала рекомендованы к использованию приведенные ниже разработанные функциональные молекулярные маркеры.

*KASP маркер для выявления SNP (A/G) в гене *PhyO* ели.*

Ген *PhyO* является фоторецептором и отвечает за восприятие света в красном (Red) и дальнем красном (Far Red) спектрах, играя фундаментальную роль в регулировании процессов роста и развития в зависимости от качества света. Ранее было установлено, что частота встречаемости аминокислотной замены Asn835Ser в результате SNP (A/G) в гене фоторецептора фитохрома *PhyO* в популяциях ели европейской разного широтного происхождения тесно коррелирует с изменением длины светового дня и соотно-

нением разных длин волн красного света в местах их произрастания. Частота встречаемости аллеля, кодирующего аспарагин (SNP, A, Asn835), уменьшается в естественных популяциях ели при продвижении по территории Швеции от 67% на севере до 21% на юге [Ranade, García-Gil, 2023]. Соответственно, при продвижении с севера на юг повышается встречаемость альтернативной аллели (SNP, G, 835Ser). Пример использования KASP-маркера, разработанного для гена ели *PhyO* SNP(A/G), представлен на рис. 5.

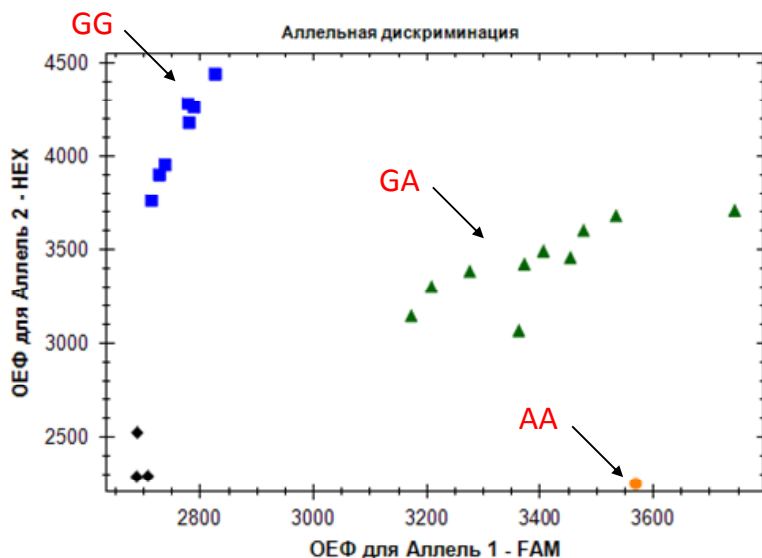


Рис. 5. Пример работы KASP-маркера. Визуализация успешно работающего KASP-маркера, разработанного для гена ели *PhyO* SNP(A/G)

Fig. 5. Example of KASP-marker performance: visualization of a successfully functioning KASP-marker developed for the *PhyO* Gene SNP (A/G) in Norway spruce

KASP-маркер для выявления SNP (G/C) в гене *CRY1* ели.

KASP-маркер для выявления SNP (G/C) в гене *CRY1* ели разработан на полиморфизм, который был впервые обнаружен в ходе секвенирования тестовой выборки елей. Ген *CRY1* кодирует фоторецептор, отвечающий за восприятие света в синем спектре. Как и для другого фитохрома *PhyO*, для

гена *CRY1* ранее сообщалось о наличии широтной клинальности в распространении аллелей в популяциях ели. SNP в экзоне 4 гена *CRY1* ранее не был описан в литературных источниках. Этот впервые выявленный полиморфизм является функциональным, так как приводит к изменению структуры кодируемого белка. На рис. 6 показано, как KASP-маркирование данного полиморфизма может быть использовано для скрининга этой важной функциональной нуклеотидной замены в последовательности гена *CRY1* на выборке 100 генотипов ели.

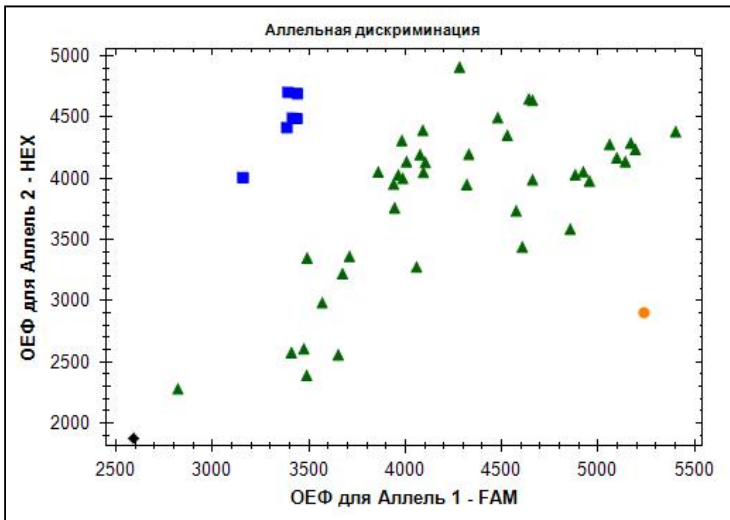


Рис. 6. Пример использования KASP-маркера, разработанного для гена ели *CRY1* SNP(G/C). Синие квадраты – GG, зеленые треугольники – GC, желтые круги – CC

Fig. 6. Example of the usage of KASP-marker developed for the *CRY1* Gene SNP (G/C) in Norway Spruce. Blue squares – GG, green triangles – GC, yellow circles – CC

HRM-маркер для выявления SNP (C/G) в гене PRR1 сосны.

Ген *PRR1* – один из генов циркадных ритмов у растений, который играет важную роль в формировании фотопериодической реакции. Ген влияет на ритмы закладки и распускания почек, ранее в литературе сообщалось о корреляции между миссенс-мутациями в данном гене и сроками закладки

почек у хвойных. HRM-маркер для выявления SNP (C/G) в гене *PRR1* сосны был разработан по результатам секвенирования тестовой выборки деревьев сосны. Пример работы HRM-маркера, разработанного для этого SNP, представлен на рис. 7.

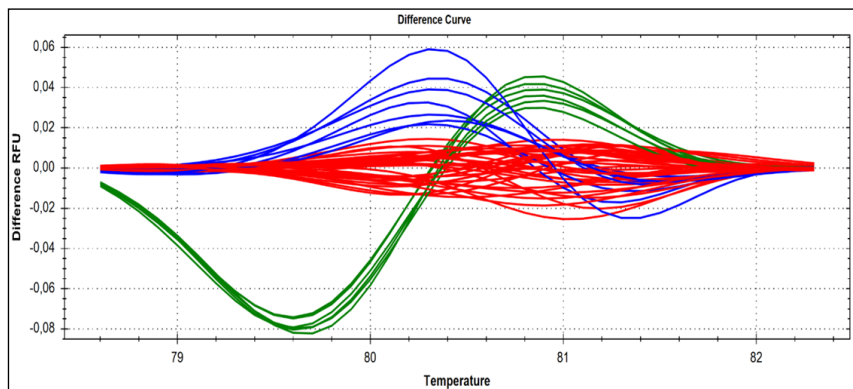


Рис. 7. Пример работы HRM-маркера. Кластеризация образцов тестовой выборки сосны в зависимости от температуры плавления ПЦР-продукта гена *PRR1*, содержащего SNP (C/G). Синим цветом показана температура плавления для генотипов CC, зеленым – GG, красным – для гетерозигот CG

Fig. 7. Example of HRM-marker performance: clustering of test sample Scots pine based on the melting temperature of the PCR product of the *PRR1* gene containing SNP (C/G). Blue lines – melting curve for CC genotypes, green – GG, red – for heterozygotes CG

Заключение. Разработанные молекулярные маркеры на основе KASP-и HRM-технологий позволяют проводить эффективный скрининг аллелей, связанных с адаптивными признаками ели и сосны, что открывает широкие перспективы для использования их в лесной селекции и при мониторинге популяций. Эти маркеры могут использоваться для оценки адаптивного потенциала лесного генетического материала, обеспечивая лесовосстановительные программы генетически приспособленным посадочным материалом. В условиях меняющегося климата подобные подходы могут значительно повысить устойчивость лесных экосистем к экологическим стрессам и способствовать восстановлению лесов с учетом изменения климата.

Применение разработанных маркеров также открывает перспективы для селекционных программ, позволяя отбирать генотипы, оптимально приспособленные к экологическим условиям конкретного местообитания. Массовый скрининг лесных насаждений с использованием функциональных молекулярных маркеров позволил бы более точно установить степень влияния этих аллельных вариантов на формирование адаптивных признаков у хвойных пород.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет средств федерального бюджета в рамках государственного задания ФБУ «СПб-НИИЛХ» (№ 053-00012-24-00).

Библиографический список

Королева Т.С., Константинов А.В., Шунькина Е.А. Угрозы и социально-экономические последствия изменения климата для лесного сектора // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. 2015. № 3. С. 55-71.

Chen J., Källman T., Ma X., Gyllenstrand N., Zaina G., Morgante M., Bousquet J., Eckert A., Wegrzyn J., Neale D., Lagercrantz U., Lascoux M. Disentangling the roles of history and local selection in shaping clinal variation of allele frequencies and gene expression in Norway spruce (*Picea abies*) // Genetics. 2012. Vol. 191, no. 3. P. 865–881.

Chen J., Tsuda Y., Stocks M., Källman T., Xu N., Kärkkäinen K., Huotari T., Semerikov V.L., Vendramin G.G., Lascoux M. Clinal variation at phenology-related genes in spruce: parallel evolution in FTL2 and Gigantea // Genetics. 2014. Vol. 197, no. 3. P. 1025–1038.

Kujala S.T., Savolainen O. Sequence variation patterns along a latitudinal cline in Scots pine (*Pinus sylvestris*): signs of clinal adaptation? // Tree Genetics & Genomes. 2012. Vol. 8. P. 1451–1467.

Rahimah A.B., Cheah S. C., Rajinder S. Freeze-drying of oil palm (*Elaeis guineensis*) leaf and its effect on the quality of extractable DNA // J. Oil Palm Res. 2006. Vol. 18. P. 296–304.

Ranade S.S., García-Gil M. R. Molecular signatures of local adaptation to light in Norway spruce // Planta. 2021. Vol. 253. P. 1–18.

Ranade S.S., García-Gil M. R. Clinal variation in PHY (PAS domain) and CRY (CCT domain)—Signs of local adaptation to light quality in Norway spruce // Plant, Cell & Environment. 2023. Vol. 46, no. 8. P. 2391–2400.

Rweyongeza D.M., Yeh F.C., Dhir N.K. Genetic parameters for bud flushing and growth characteristics of white spruce seedlings // Silvae Genetica. 2010. T. 59, no. 1–6. P. 151–158.

Way D.A., Oren R. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data // *Tree physiology*. 2010. Vol. 30, no. 6. P. 669–688.

References

Chen J., Källman T., Ma X., Gyllenstrand N., Zaina G., Morgante M., Bousquet J., Eckert A., Wegrzyn J., Neale D., Lagercrantz U., Lascoux M. Disentangling the roles of history and local selection in shaping clinal variation of allele frequencies and gene expression in Norway spruce (*Picea abies*). *Genetics*, 2012, vol. 191, no. 3, pp. 865–881.

Chen J., Tsuda Y., Stocks M., Källman T., Xu N., Kärkkäinen K., Huotari T., Semerikov V.L., Vendramin G.G., Lascoux M. Clinal variation at phenology-related genes in spruce: parallel evolution in FTL2 and Gigantea. *Genetics*, 2014, vol. 197, no. 3, pp. 1025–1038.

Koroleva T.S., Konstantinov A.V., Shun'kina E.A. Threats and socio-economic impacts of climate change for the forest sector. *Proceedings of the Saint Petersburg Forestry Research Institute*, 2015, no. 3, pp. 55–71. (In Russ.)

Kujala S.T., Savolainen O. Sequence variation patterns along a latitudinal cline in Scots pine (*Pinus sylvestris*): signs of clinal adaptation? *Tree Genetics & Genomes*, 2012, vol. 8, pp. 1451–1467.

Rahimah A.B., Cheah S.C., Rajinder S. Freeze-drying of oil palm (*Elaeis guineensis*) leaf and its effect on the quality of extractable DNA. *J. Oil Palm Res.*, 2006, vol. 18, pp. 296–304.

Ranade S.S., Garcia-Gil M.R. Molecular signatures of local adaptation to light in Norway spruce. *Planta*, 2021, vol. 253, pp. 1–18.

Ranade S.S., Garcia-Gil M.R. Clinal variation in PHY (PAS domain) and CRY (CCT domain)—Signs of local adaptation to light quality in Norway spruce. *Plant, Cell & Environment*, 2023, vol. 46, no. 8, pp. 2391–2400.

Rweyongeza D.M., Yeh F.C., Dhir N.K. Genetic parameters for bud flushing and growth characteristics of white spruce seedlings. *Silvae Genetica*, 2010, T. 59, no. 1–6, pp. 151–158.

Way D.A., Oren R. Differential responses to changes in growth temperature between trees from different functional groups and biomes: a review and synthesis of data. *Tree physiology*, 2010, vol. 30, no. 6, pp. 669–688.

Материал поступил в редакцию 15.05.2024

Волков В.А., Каржаев Д.С., Сафроничева Е.Д., Тис М.В., Чухланцева К.В., Шаршавикова В.В., Потокина Е.К. Использование KASP- и HRM-маркеров для выявления полиморфизмов, влияющих на адаптивные признаки сосны и ели // *Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии*. 2024. Вып. 251. С. 229–244. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.229-244

Изменение климатических условий оказывает значительное влияние на лесные экосистемы, особенно на хвойные породы, такие как сосна обыкновенная (*Pinus sylvestris*) и ель европейская (*Picea abies*), которые составляют основу лесов умеренной зоны. Адаптация этих видов к новым экологическим условиям требует учета генетической изменчивости ключевых адаптивных признаков. Настоящее исследование направлено на изучение однонуклеотидных полиморфизмов (SNP) в генах-кандидатах, регулирующих фотопериодическую реакцию и циркадные ритмы, которые играют важную роль в физиологических процессах деревьев. В работе описываются разработка и тестирование молекулярных маркеров, основанных на методах KASP (Kompetitive Allele Specific PCR) и HRM (High Resolution Melting), для массового генотипирования деревьев. Были идентифицированы SNP в генах фоторецепторов PhyO и CRY1, а также в генах фотопериодической реакции PRR1 и PRR7. Аллельный полиморфизм этих генов демонстрирует географическую клинальность, что свидетельствует об их значительной роли в адаптации деревьев к широтным изменениям фотопериода и температурным градиентам. Результаты исследования подтверждают эффективность методов KASP и HRM для генотипирования, что позволяет использовать разработанные маркеры для мониторинга генетического разнообразия популяций и отбора наиболее адаптивных генотипов в селекционных программах. Такие подходы обеспечивают использование генетически приспособленного посадочного материала в лесовосстановительных мероприятиях, что особенно актуально в условиях меняющегося климата.

Ключевые слова: сосна обыкновенная, ель европейская, однонуклеотидные полиморфизмы, молекулярные маркеры, KASP, HRM, фотопериодическая реакция, циркадные ритмы, генетическое разнообразие, адаптивные признаки, лесовосстановление, климатические изменения.

Volkov V.A., Karzhaev D.S., Safronycheva E.D., Tis M.V., Chukhlantseva K.V., Sharshavikova V.V., Potokina E.K. Application of KASP and HRM markers for detecting polymorphisms affecting adaptive traits in Scots pine and Norway spruce. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 229–244 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.229-244

Climate change significantly impacts forest ecosystems, particularly coniferous species such as Scots pine (*Pinus sylvestris*) and Norway spruce (*Picea abies*), which form the basis of temperate forests. The adaptation of these species to new environmental conditions necessitates consideration of the genetic variability of key adaptive traits. This study investigates single nucleotide polymorphisms (SNPs) in candidate genes that regulate photoperiodic response and circadian rhythms, which are critical to tree physiological processes. The research describes the development and testing of molecular markers based on KASP (Kompetitive Allele

Specific PCR) and HRM (High Resolution Melting) methods for high-throughput genotyping. SNPs were identified in the photoreceptor genes *PhyO* and *CRY1* and the photoperiodic response genes *PRR1* and *PRR7*. These polymorphisms exhibit geographic clinality, highlighting their significant role in tree adaptation to latitudinal gradients of light and temperature conditions. The findings confirm the efficiency of KASP and HRM methods for genotyping, enabling the use of these markers for monitoring genetic diversity and selecting resilient genotypes in breeding programs. Such approaches ensure the integration of genetically adapted planting material into reforestation efforts, which is particularly relevant in the context of changing climate conditions.

Keyrords: Scots pine, Norway spruce, single nucleotide polymorphisms, molecular markers, KASP, HRM, photoperiodic response, circadian rhythms, genetic diversity, adaptive traits, reforestation, climate change.

ВОЛКОВ Владимир Александрович – директор центра биоинформатики и геномных исследований Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова; научный сотрудник научно-исследовательского отдела генетики и биотехнологий Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, кандидат биологических наук. SPIN-код: 1473-9800. ORCID: 0000-0002-2933-4456.

194021, Институтский пер., д 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия; 194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: vol-j@mail.ru

VOLKOV Vladimir. A. – PhD (Biological), Director of the Center for Bioinformatics and Genomic Research of St.Petersburg State Forest Technical University; researcher of the Research Department of Genetics and Biotechnology, Saint-Petersburg Forestry Research Institute. SPIN-code: 1473-9800. ORCID: 0000-0002-2933-4456.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia; 194021. Institutskiy av. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: vol-j@mail.ru

КАРЖАЕВ Дмитрий Сергеевич – младший научный сотрудник центра биоинформатики и геномных исследований Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, аспирант СПбГЛТУ; младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела генетики и биотехнологий Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. SPIN-код: 1864-2827. ORCID: 0000-0002-2444-9502.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия; 194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: karzhaevd@gmail.com

KARZHAEV Dmitry S. – junior researcher at the Centre for Bioinformatics and Genomic Research of St. Petersburg State Forest Technical University, PhD student of SPbFTU; junior researcher of the Research Department of Genetics and Biotechnology of the St. Petersburg Forestry Research Institute. SPIN-code: 1864-2827. ORCID: 0000-0002-2444-9502.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia; 194021. Institutskiy av. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: karzhaevd@gmail.com

САФРОНЫЧЕВА Елизавета Дмитриевна – младший научный сотрудник научно-исследовательского отдела генетики и биотехнологий Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. SPIN-код: 4971-2924.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: esafronycheva@mail.ru

SAFRONYCHEVA Elizaveta D. – Junior researcher of the Research Department of Genetics and Biotechnology of the St. Petersburg Forestry Research Institute. SPIN-code: 4971-2924.

194021. Institutskiy av. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: esafronycheva@mail.ru

ТИС Маргарита Витальевна – лаборант-исследователь научно-исследовательского отдела генетики и биотехнологий Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. SPIN-код: 1716-7665.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия.

TIS Margarita V. – Research assistant of the Research Department of Genetics and Biotechnology of the St. Petersburg Forestry Research Institute. SPIN-code: 1716-7665.

194021. Institutskiy av. 21. St. Petersburg. Russia.

ЧУХЛАНЦЕВА Ксения Витальевна – лаборант-исследователь научно-исследовательского отдела генетики и биотехнологий Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия.

CHUKHLANTSEVA Ksenia V. – Research assistant of the Research Department of Genetics and Biotechnology of the St. Petersburg Forestry Research Institute.

194021. Institutskiy av. 21. St. Petersburg. Russia.

ШАРШАВИКОВА Вероника Владимировна – лаборант-исследователь научно-исследовательского отдела генетики и биотехнологий Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия.

SHARSHAVIKOVA Veronika V. – Research assistant of the Research Department of Genetics and Biotechnology of the St. Petersburg Forestry Research Institute.

194021, Institutskiy av. 21. St. Petersburg. Russia.

ПОТОКИНА Елена Кирилловна – ведущий научный сотрудник научно-исследовательского отдела генетики и биотехнологий Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства, доктор биологических наук. SPIN-код: 7270-0032.

194021, Институтский пр., д. 21, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: e.potokina@yahoo.com

POTOKINA Elena K. – DSc (Biological), Senior researcher of the Research Department of Genetics and Biotechnology of the St. Petersburg Forestry Research Institute. SPIN-code: 7270-0032.

194021, Institutskiy av. 21. St. Petersburg. Russia. E-mail: e.potokina@yahoo.com

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

УДК 630*37

**А.В. Андронов, Г.С. Тарадин, Д.В. Болотин, В.С. Никонов,
М.М. Иготти, С.С. Петросян, В.Е. Божбов**

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ СЖАТИЯ УПРОЧНЯЮЩЕГОСЯ ГРУНТА ДЛЯ РАСЧЕТА КОЛЕЕОБРАЗОВАНИЯ В ЭЛЕМЕНТАРНЫХ ФУНКЦИЯХ

Введение. Условия движения лесных машин отличаются многообразием. Возможны случаи работы техники на разнородных почвогрунтах, упрочняющихся по глубине, либо наоборот – с прочным верхним слоем, расположенным на сравнительно слабом подстилающем слое (например, задернованные поверхности болот [Куницкая и др., 2024a]). Кроме того, лесная техника работает на заснеженных лесосеках; рыхлый снег заметно уплотняется при образовании колеи, его механические свойства повышаются под воздействием движителя машины. Оба отмеченных случая представляют интерес как теоретический, так и практический. До настоящего времени слабо проработаны математические модели и научные положения теории движения лесных машин, раскрывающие характер взаимодействия движителей с упрочняющимися грунтами [Хитров и др., 2023; Куницкая и др., 2024b]. На практике отсутствие законченного научного описания осложняет обоснование параметров и режимов работы движителей машин, совместимых с подобными почвенно-грунтовыми условиями, затрудняет подбор проходимой лесной техники.

Целью работы является разработка и исследование математических моделей образования колеи, учитывающих переменный характер механических свойств грунтов, находящихся под воздействием движителей лесных машин.

Методы исследования. Исследование основано на положениях механики грунтов и теории движения лесных машин. При разработке математических моделей использованы классические методы математического анализа и приближения функций. Реализация моделей выполнена на языке программирования Python.

Результаты исследования. Вначале изложим общую постановку задачи. Известно [Агейкин, 1981], что суммарная линейная деформация слоя грунта мощностью H определяется в результате интегрирования функции сжатия элементарных слоев грунта по глубине:

$$c = \int_0^{H-c} dc, \quad (1)$$

где абсолютная величина сжатия элементарного слоя dc [Агейкин, 1981]:

$$dc = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} dz, \quad (2)$$

где ε – относительная деформация сжатия; z – вертикальная координата, отсчитываемая от поверхности вглубь массива грунта.

Как правило, рассматривается линейная составляющая, относительная деформация ε принимается линейной функцией напряжения сжатия:

$$\varepsilon = E\sigma, \quad (3)$$

где E – характеристика податливости грунта; σ – сжимающее напряжение, затухающее по глубине грунта, $\sigma = \sigma(z) = \sigma_z$ [Агейкин, 1981]:

$$\sigma_z = \frac{q}{1 + fz^2}, \quad (4)$$

где f – коэффициент, характеризующий кривую затухания напряжения по глубине грунта, связанный с геометрией пятна контакта; q – параметр воздействия движителя на грунт:

$$q = Jp, \quad (5)$$

где J – коэффициент, учитывающий форму и соотношение сторон пятна контакта; p – среднее давление движителя по пятну контакта.

Выражение для податливости K в общем виде:

$$K = \frac{1}{E \cdot \omega}, \quad (6)$$

где ω – множитель, позволяющий учесть реологическую модель грунта. Например, для модели Максвелла, K вводится по формуле [Агейкин, 1981]:

$$K = \frac{1}{E \cdot \left(1 + e^{-t \frac{E_0}{\eta}} \right)}, \quad (7)$$

где t – время воздействия движителя на грунт, E_d – длительный модуль деформации грунта, η – реологический параметр грунта (вязкость), тогда в формуле (6) следует записать

$$\omega = 1 + e^{-t \frac{E_0}{\eta}}. \quad (8)$$

Теперь, для получения новых результатов, положим, что модуль E изменяется по глубине в соответствии с зависимостью:

$$E_z = \frac{E}{1 + \kappa z^k}, \quad (9)$$

где k – целое число; κ – числовой коэффициент.

Параметры k , κ подбираются таким образом, чтобы функция E_z соответствовала экспериментальным данным. Подбор параметров позволит моделировать как увеличение значения модуля по глубине, по характеру близкое к линейному, так и снижение (например, для случая движения по задернованному болоту, что соответствует особо сложным условиям работы лесных машин).

В результате интегрирования (1), с учетом (2)–(4) при выражении модуля E по (9) получим следующие уравнения. При $k = 0$ свойства грунта неизменны по глубине:

$$c = \frac{Kq}{c_0} \operatorname{arctg} \left(\frac{(H - c)f}{c_0} \right), \quad (10)$$

для удобства записи в формуле обозначено:

$$c_0 = \sqrt{(1 - Kq)f}; \quad (11)$$

при $k = 1$ изменение свойств по характеру близко к линейному:

$$c = \frac{K^2 \kappa^2 q^2 + 2Kqf}{c_1 f} \left(\operatorname{arctg} \frac{K\kappa q}{c_1} + \operatorname{arctg} \frac{2f(H - c) - K\kappa q}{c_1} \right) + \frac{K\kappa q}{2f} \ln \frac{K\kappa q(H - c) - f(H - c)^2 + Kq - 1}{Kq - 1}, \quad (12)$$

где обозначено:

$$c_1 = \sqrt{-K^2 \kappa^2 q^2 - 4Kqf + 4f}; \quad (13)$$

при $k = 2$ наблюдается более резкое изменение свойств грунта по глубине:

$$c = \frac{Kq(f - \kappa)}{c_2(K\kappa q - f)} \operatorname{arctg} \frac{(K\kappa q - f)(H - c)}{c_2} - \frac{K\kappa q(H - c)}{K\kappa q - f}, \quad (14)$$

где обозначено:

$$c_2 = \sqrt{(Kq - 1)(K\kappa q - f)}. \quad (15)$$

Формулы (12), (14), очевидно, переходят в (10) при $\kappa = 0$. Аналитические выражения (12), (14) в элементарных функциях получены нами впервые, учитывают как постепенное, так и возможное более резкое изменение механических свойств грунта по глубине и позволяют проводить вычислительные эксперименты с математической моделью взаимодействия движителя машины с грунтом в особо сложных условиях, таких как задержанные лесные почвогрунты на заболоченных участках.

Уточним положения теории взаимодействия движителей лесных машин с грунтами, касающиеся случаев, когда упрочнение происходит непосредственно в процессе взаимодействия с движителем ввиду изменения плотности грунта.

Например, при движении машины по глубокому снегу происходит его уплотнение при образовании колеи под движителем, что существенно изменяет физическую картину процесса. Очевидно, что в процессе образования колеи использовать постоянное значение модуля E неверно, о чем неоднократно упоминалось ранее [Хитров и др., 2023]. Это обстоятельство учитывалось ранее, однако решения (1) в элементарных функциях в научной литературе представлены лишь для частных случаев линейного упрочнения [Петросян и др., 2022].

Рассмотрим случай, когда модуль деформации E является линейной функцией плотности. Тогда, с учетом соотношения относительной деформации ε и плотности ρ , и выражения для коэффициента податливости K , получим:

$$\varepsilon_z = (1 - \varepsilon_z) K \sigma_z, \quad (16)$$

Такое выражение можем использовать при изучении показателей работы техники, например, в условиях линейно упрочняющихся торфяников.

Для случаев квадратичного упрочнения по плотности, например, для снега, запишем:

$$\varepsilon_z = (1 - \varepsilon_z)^2 K \sigma_z. \quad (17)$$

Отметим, что вопрос об изменении реологического параметра ω , использующегося в (6), при уплотнении грунта потребует дальнейших обширных экспериментальных исследований.

Решение (16) относительно ε_z очевидно:

$$\varepsilon_z = \frac{\sigma_z K}{1 + \sigma_z K}. \quad (18)$$

Интегрирование (1) в таком случае приводит к следующему уравнению:

$$c = \frac{Kq}{\sqrt{f}} \arctg\left((H - c)\sqrt{f}\right), \quad (19)$$

решение которого позволяет найти c при допущении о линейном упрочнении грунта.

Для уравнения (17) из двух корней уравнения следует выбрать следующий:

$$\varepsilon_z = \frac{2K\sigma_z + 1 - \sqrt{4K\sigma_z + 1}}{2K\sigma_z}, \quad (20)$$

поскольку для второго корня $\varepsilon_z = \frac{2K\sigma_z + 1 + \sqrt{4K\sigma_z + 1}}{2K\sigma_z} > 1$, что противоречит физическому смыслу задачи.

Использование выражения (20) в представленном виде при интегрировании (1) приводит к следующему выражению для интеграла $\int \frac{\varepsilon_z}{1 - \varepsilon_z} dz$:

$$\begin{aligned} \varepsilon_z = \int \frac{\varepsilon_z}{1 - \varepsilon_z} dz = & -\frac{2Kq}{\sqrt{-f}} F\left(z\sqrt{-\frac{f}{4qK+1}}, \sqrt{4qK+1}\right) - \\ & - \frac{1}{2\sqrt{-f}} E\left(z\sqrt{-\frac{f}{4qK+1}}, \sqrt{4qK+1}\right) + \frac{z}{2}, \end{aligned} \quad (21)$$

где $F(k, t)$, $E(k, t)$ – соответственно неполный эллиптический интеграл I и II рода:

$$F(x, k) = \int_0^x \frac{1}{\sqrt{1-t^2}\sqrt{1-k^2t^2}} dt, \quad E(x, k) = \int_0^x \frac{\sqrt{1-k^2t^2}}{\sqrt{1-t^2}} dt, \quad (22)$$

где $x = z\sqrt{-\frac{f}{4qK+1}}$, $k = \sqrt{4qK+1}$.

При современном уровне развития программного обеспечения «точечное» вычисление интегралов (21) не представляет существенных сложностей. Однако, поскольку выражение для c служит основой уравнения для расчета фактической деформации опорной поверхности h и оценки сопротивления движению, для реализации дальнейших вычислительных экспериментов потребуется выражение c , заданное в элементарных функциях.

Для разрешения этого обстоятельства разложим (21) в ряд Тейлора в точке $z = z_0$:

$$\epsilon_z = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\epsilon_{z|z=z_0}^{(k)}}{k!} (z - z_0)^k, \quad (23)$$

причем член ряда при $k = 0$ содержит в себе интегралы вида (21).

Далее обозначим:

$$\epsilon_z = \epsilon_0 + \sum_{k=1}^{\infty} \epsilon_k (z - z_0)^k, \quad (24)$$

где коэффициент $\epsilon_0 = \epsilon_{z|z=z_0}$ не зависит от z и может быть либо вычислен однократно, либо представлен приближенным разложением в ряд, например,

$\epsilon_0 = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\epsilon_{z|z=z_0}^{(k)}}{k!} z_0^k$. Последующие коэффициенты при $k \geq 1$, равные

$\epsilon_k = \frac{\epsilon_{z|z=z_0}^{(k)}}{k!}$, записываются в элементарных функциях и не зависят от z .

Ограничиваясь n членами ряда, запишем уравнение для c :

$$c = \epsilon_0 + \sum_{k=1}^n \epsilon_k (H - c - z_0)^k. \quad (25)$$

Точку z_0 определим из следующих соображений. Учтем, что, согласно теореме о представлении остаточного члена разложения:

$$R_n = \frac{\epsilon_z^{(n+1)} (z - z_0)^{n+1}}{(n+1)!} (z_0 - \theta \cdot (z - z_0)), \quad 0 < \theta < 1, \quad (26)$$

и далее определим z_0 из условия:

$$z_0 = \arg \min \left(\max \frac{1}{H} \int_0^H (z - z_0)^{n+1} (z_0 - \theta \cdot (z - z_0)) dz \right), \quad (27)$$

что соответствует $z_0 = H/2$.

Например, при $n = 3$ получим:

$$c = \epsilon_0 + \sum_{k=1}^3 \epsilon_k \left(\frac{H}{2} - c \right)^k, \quad (28)$$

где

$$\epsilon_1 = \frac{fH^2 + 16qK + 4 - \sqrt{fH^2 + 16qK + 4} \sqrt{fH^2 + 4}}{2\sqrt{fH^2 + 16qK + 4} \sqrt{fH^2 + 4}}, \quad (29)$$

$$\epsilon_2 = -\frac{16HKqf}{2\sqrt{fH^2 + 16qK + 4}(fH^2 + 4)^{\frac{3}{2}}}, \quad (30)$$

$$\epsilon_3 = \frac{32\left(3f^2H^4 + 32\left(qK + \frac{1}{4}\right)H^2f - 64qK - 16\right)Kqf}{(fH^2 + 16qK + 4)^{\frac{3}{2}}(fH^2 + 4)^{\frac{5}{2}}}, \quad (31)$$

и различия результатов расчетов с использованием (21) и (28) становятся практически не различимы.

Формулы (19) и (28) записаны в элементарных функциях, получены нами впервые и предназначены для расчета деформации сжатия грунта, модуль деформации которого соответственно линейно и квадратично зависит от плотности при проведении вычислительных экспериментов по изучению показателей взаимодействия движителей лесных машин с опорными поверхностями в виде, соответственно, торфа и снега.

Фактическая глубина колеи определяется как решение уравнения:

$$h = k_{ps}c, \quad (32)$$

где p_s – несущая способность опорной поверхности [Ларин, 2007; Дмитриев и др., 2024]:

$$\left\{ \begin{array}{l} p_s = p_{s0}\alpha_z \\ p_{s,0} = 0,5J_1N_1b\gamma + N_2\gamma h + J_3N_3C \\ J_1 = \frac{l}{l+0,4b}, \quad J_3 = \frac{l+b}{l+0,5b} \\ N_1 = \frac{1-\text{III}^4}{\text{III}^5}, \quad N_2 = \frac{1}{\text{III}^2}, \quad N_3 = \frac{2 \cdot (1+\text{III}^2)}{\text{III}^3}, \quad \text{III} = \text{tg} \frac{\pi-2\varphi}{4} \\ \alpha_z = 1 + h \cdot \frac{\frac{\sqrt{2}}{2}b \text{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4}\right) \text{tg} \frac{3\varphi}{4}\right]}{2H \cdot \left(H - h - 0,25 \frac{\sqrt{2}}{2}b \text{tg} \varphi \cos \frac{3\varphi}{4} \exp\left[\left(\frac{\pi}{4} + \frac{3\varphi}{4}\right) \text{tg} \frac{3\varphi}{4}\right]\right)}, \end{array} \right. \quad (33)$$

где $p_{s,0}$ – несущая способность почвогрунта без учета мощности деформируемого слоя; α_z – коэффициент учета мощности деформируемого слоя почвогрунта; J_1, J_3 – коэффициенты, учитывающие соотношение усредненной длины и ширины пятна контакта; N_1, N_2, N_3 – коэффициенты, учитывающие

фрикционные свойства почвогрунта; B_1, B_3 – коэффициенты, учитывающие отклонения угла вектора результирующей нагрузки от нормали к поверхности контакта; l, b – соответственно длина и ширина пятна контакта.

Коэффициент сопротивления движению находится расчетным путем, численным интегрированием функции $p(h) = p_h$ для заданного значения p [Зорин и др., 2022]:

$$\varphi = \frac{1}{pl} \int_0^h p_h dh. \tag{34}$$

Для иллюстрации результатов воспользуемся квадратичной функцией, полученной на основе приближения справочных сведений [Ларин, 2007]:

$$E = a_E \rho^2, \tag{35}$$

где ρ – начальная плотность снега (кг/м^3).

Степенные функции $\varphi = \varphi(E), C = C(E)$:

$$\varphi = a_\varphi E^{b_\varphi}, \tag{36}$$

$$C = a_C E^{b_C}, \tag{37}$$

Коэффициенты функций (35)–(37) для трех диапазонов изменения температуры снега приведены в табл. 1 [Ларин, 2007].

Таблица 1

Коэффициенты для расчета механических свойств снега
Coefficients for mechanical properties of snow estimation

Температура	$E = E(\rho), \text{МПа}$		$\varphi = \varphi(E)$		$C = C(E), \text{МПа}$	
	a_E	b_E	a_φ	b_φ	a_C	b_C
$T = -1 \dots -3 \text{ }^\circ\text{C}$	15,941	2	19,657	0,1365	0,0021	1,0698
$T = -4 \dots -22 \text{ }^\circ\text{C}$	21,023	2	22,583	0,0892	0,0013	1,5762
$T \leq -22 \text{ }^\circ\text{C}$	26,662	2	24,353	0,0927	0,0023	1,4585

Расчеты проиллюстрированы на рис. 1 для температуры $T = -4 \dots -22 \text{ }^\circ\text{C}$. Параметры модели: $b = 0,7 \text{ м}$; $l = 0,665 \text{ м}$; $k_{ps} = 0,7 \exp(p/p_s)^{2,5}$; $J = 0,98$; $f = 1,088$; $H = 1,0 \text{ м}$ [Должиков и др., 2024; Куницкая и др., 2024а] (движение колесной лесной машины по глубокому рыхлому снегу). Расчет выполнен в подготовленной и зарегистрированной нами программе [Андронов и др., 2024].

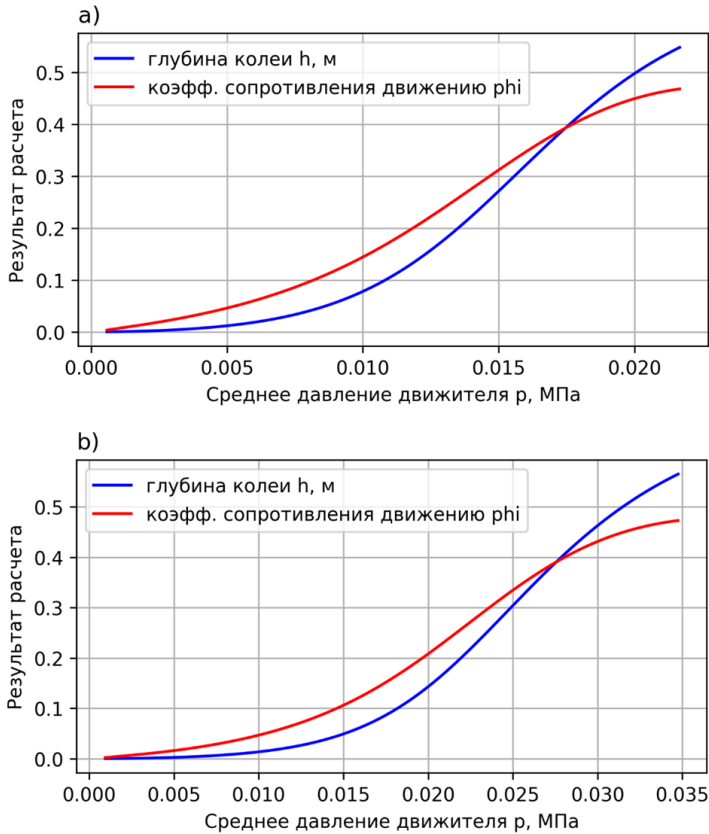


Рис. 1. Глубина колеи и коэффициент сопротивления движению:
а) начальная плотность снега 100 kg/m^3 , б) начальная плотность снега 150 kg/m^3

Fig. 1. Rut depth and the rolling resistance coefficient estimates:
а) initial snow density 100 kg/m^3 , б) initial snow density 150 kg/m^3

Закключение. На основе решения уравнения образования колеи впервые получены аналитические выражения в элементарных функциях, учитывающие как постепенное, так и возможное более резкое изменение механических свойств грунта по глубине. Уравнения (12), (14) позволят проводить вычислительные эксперименты с математической моделью взаимодействия движителя машины с грунтом в особо сложных условиях, представленных задернованными грунтами (более прочный верхний слой на слабонесущем подстилающем слое).

В результате решения уравнения образования колеи получены выражения в элементарных функциях, учитывающие повышение оценок механических свойств опорной поверхности (упрочнение). Формулы (19) и (28) предназначены для расчета показателей взаимодействия движителей лесных машин, работающих в особо сложных условиях, с опорными поверхностями, представленными линейно упрочняющимися торфяниками и квадратично упрочняющимся рыхлым снегом.

Вклад авторов: Андронов А.В.: разработка математических моделей (50%); Тарадин Г.С.: программная реализация (5%); Болотин Д.В.: программная реализация (10%); Никонов В.С.: программная реализация (10%); Иготти М.М.: программная реализация (10%); Петросян С.С.: программная реализация (10%); Божбов В.Е.: программная реализация (5%).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Агейкин Я.С. Проходимость автомобилей. М.: Машиностроение, 1981. 232 с.
- Андронов А.В., Болотин Д.В., Хитров Е.Г., Никонов В.С. Проходимость и технологическая эффективность лесных машин в особо сложных почвенно-грунтовых условиях. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024681626, 11.09.2024. Заявка от 27.08.2024.
- Дмитриев А.С., Должииков И.С., Куницкая О.А., Хитров Е.Г., Дьяченко В.М., Швецов А.С. Теоретическое обоснование параметров движителя колесно-гусеничной лесной машины // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 1 (61). С. 163–170.
- Должииков И.С., Курочкин П.А., Хитров Е.Г., Дьяченко В.М., Михайлова Л.М., Григорьев И.В., Ревяко С.И. Интеллектуальный анализ параметров и классификация лесных и сельскохозяйственных колесных тракторов // Системы. Методы. Технологии. 2024. № 2 (62). С. 87–94.
- Зорин М.В., Петросян С.С., Куницкая О.А., Макуев В.А., Долматов Н.П., Григорьев И.В., Хитров Е.Г. Исследование максимальной оценки коэффициента сцепления движителя с опорной поверхностью // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 239. С. 191–201.
- Куницкая О.А., Должииков И.С., Хитров Е.Г., Курочкин П.А., Григорьев И.В. Природно-производственные условия применения средств малой механизации для малообъемного лесопользования и лесохозяйственных работ // Свидетельство о регистрации базы данных RU 2024622845, 28.06.2024а. Заявка от 13.06.2024.
- Куницкая О.А., Должииков И.С., Хитров Е.Г., Михайлова Л.М., Григорьев И.В. Расчет глубины колеи, тягово-сцепных свойств и проходимости движителей малогабаритных лесных машин // Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ RU 2024664937, 26.06.2024б. Заявка от 13.06.2024.
- Ларин В.В. Методы прогнозирования и повышения опорной проходимости многоосных колесных машин на местности: дисс. ... д-ра техн. наук. М.: Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, 2007. 607 с.

Петросян С.С., Отмахов Д.В., Алексеенко В.Г., Ревяко С.И., Егорин А.А., Хитров Е.Г. Модель образования колеи на линейно упрочняющемся грунте при периодической нагрузке // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2022. Вып. 238. С. 88–98.

Хитров Е.Г., Должииков И.С., Дмитриев А.С., Каляшов В.А., Григорьев И.В., Григорьева О.И. Расчет коэффициента сцепления колесного движителя лесной машины с почвогрунтом // ИВУЗ. Лесной журнал. 2023. № 5 (395). С. 126–134.

References

Ageikin Ya.S. Vehicles' off-the-road locomotion. M.: Mashinostroenie, 1981. 232 p. (In Russ.)

Andronov A.V., Bolotin D.V., Khitrov E.G., Nikonov V.S. Cross-country ability and technological efficiency of forestry machines in particularly difficult soil and ground conditions. Certificate of registration of the computer program RU 2024681626, 09.11.2024. Application dated 08.27.2024. (In Russ.)

Dmitriev A.S., Dolzhikov I.S., Kunitskaya O.A., Khitrov E.G., Dyachenko V.M., Shvetsov A.S. Theoretical substantiation of the parameters of the propulsion unit of a wheeled and tracked forestry machine. *Systems. Methods. Technologies*, 2024, no. 1 (61), pp. 163–170. (In Russ.)

Dolzhikov I.S., Kurochkin P.A., Khitrov E.G., Dyachenko V.M., Mikhailova L.M., Grigoryev I.V., Revyako S.I. Intelligent analysis of parameters and classification of forestry and agricultural wheeled tractors. *Systems. Methods. Technologies*, 2024, no. 2 (62), pp. 87–94. (In Russ.)

Khitrov E.G., Dolzhikov I.S., Dmitriev A.S., Kalyashov V.A., Grigoryev I.V., Grigoryeva O.I. Calculation of the coefficient of adhesion of the wheeled vehicle of a forestry machine with soil. *IVUZ. Forestry magazine*, 2023, no. 5 (395), pp. 126–134. (In Russ.)

Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Khitrov E.G., Kurochkin P.A., Grigoriev I.V. Natural and production conditions for the use of low-mechanization tools for small-scale forest management and forestry work. Certificate of database registration RU 2024622845, 06.28.2024a. Application dated 06.13.2024. (In Russ.)

Kunitskaya O.A., Dolzhikov I.S., Khitrov E.G., Mikhailova L.M., Grigoryev I.V. Calculation of track depth, traction properties and cross-country ability of small-sized forestry vehicles. Certificate of computer program registration RU 2024664937, 06/26/2024b. Application dated 06/13/2024. (In Russ.)

Larin V.V. Methods for predicting and improving the support cross-country ability of multi-axle wheeled vehicles on the terrain: diss. ... Doct. of Techn. Sci. M.: Bauman Moscow State Technical University, 2007. 607 p. (In Russ.)

Petrosyan S.S., Otmakhov D.V., Alekseenko V.G., Revyako S.I., Egorin A.A., Khitrov E.G. Model of rutting on linearly hardening soil under periodic loading. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2022, iss. 238, pp. 88–98. (In Russ.)

Zorin M.V., Petrosyan S.S., Kunitskaya O.A., Makuev V.A., Dolmatov N.P., Grigoryev I.V., Khitrov E.G. Study of the maximum estimate of the coefficient of adhesion of the vehicle to the supporting surface. Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii, 2022, iss. 239, pp. 191–201. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию: 08.05.2024

Андронов А.В., Тарадин Г.С., Болотин Д.В., Никонов В.С., Иготти М.М., Петросян С.С., Божбов В.Е. Математические модели сжатия упрочняющегося грунта для расчета колееобразования в элементарных функциях // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 245–259. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.245–259

До настоящего времени слабо проработаны математические модели и научные положения теории движения лесных машин, раскрывающие характер взаимодействия движителей с упрочняющимися грунтами. На практике отсутствие законченного научного описания осложняет обоснование параметров и режимов работы движителей машин, совместимых с подобными почвенно-грунтовыми условиями, затрудняет подбор проходимой лесной техники. Целью статьи является разработка и исследование математических моделей образования колеи, учитывающих переменный характер механических свойств грунтов, находящихся под воздействием движителей лесных машин. Исследование основано на положениях механики грунтов и теории движения лесных машин. При разработке математических моделей использованы классические методы математического анализа и приближения функций. На основе решения уравнения образования колеи впервые получены аналитические выражения в элементарных функциях, учитывающие как постепенное, так и возможное более резкое изменение механических свойств грунта по глубине. Полученные уравнения позволят проводить вычислительные эксперименты с математической моделью взаимодействия движителя машины с грунтом в особо сложных условиях, представленных задернованными грунтами (более прочный верхний слой на слабонесущем подстилающем слое). В результате решения уравнения образования колеи получены выражения в элементарных функциях, учитывающие повышение оценок механических свойств опорной поверхности под воздействием движителя (упрочнение). Формулы получены впервые и предназначены для расчета показателей взаимодействия движителей лесных машин, работающих в особо сложных условиях, с опорными поверхностями, представленными линейно упрочняющимися торфяниками и квадратично упрочняющимся рыхлым снегом. Реализация моделей выполнена на языке программирования Python. Приведены результаты расчета глубины колеи, образующейся на рыхлом снеге, при движении колесной лесной машины, а также оценки коэффициента сопротивления движению.

Ключевые слова: колееобразование, сопротивление движению, снег, торфяники, задернованные поверхности, лесные почвогрунты.

Andronov A.V., Taradin G.S., Bolotin D.V., Nikonov V.S., Igotti M.M., Petrosyan S.S., Bozhbov V.E. Mathematical models of strengthening ground compaction for rutting estimation eliminated in elementary functions. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 245–259 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.245-259

Mathematical models and scientific basics of the theory of forestry machines locomotion, revealing the nature of interaction of forestry vehicles with strengthening soils, have been poorly developed. In practice, the lack of a complete scientific description complicates substantiation of the parameters and operating modes of the vehicles compatible with strengthening soil and ground conditions and makes it difficult to select passable forestry equipment. The objective of the article is to develop and study mathematical models of rutting that take into account the variable nature of the mechanical properties of soils under the influence of movers of forestry machines. The study bases on the provisions of soil mechanics and the theory of locomotion of forestry machines. In the development of mathematical models classical methods of mathematical analysis and approximation of functions were used. Based on the solution of the rutting equation analytical expressions in elementary functions were obtained for the first time, taking into account both gradual and possible more abrupt changes in the mechanical properties of the soil with depth. The obtained expressions will allow conducting computational experiments with a mathematical model of the interaction of the machine propeller with the soil in particularly difficult conditions represented by sodded soils (a stronger upper layer on a weakly bearing underlying layer). Also, as a result of solving the rut formation equation, expressions were obtained in elementary functions, taking into account the increase in the estimates of the mechanical properties of the bearing surface under the influence of the vehicle (strengthening). The formulas were obtained for the first time and are intended for calculating the indicators of the interaction of forestry machine vehicles operating in especially difficult conditions with bearing surfaces of linearly hardening peatlands and quadratically strengthening loose snow. The models were implemented in Python programming language. The results of calculating the rut depth formed on loose snow when a wheeled forestry machine is moving, as well as estimates of the coefficient of the rolling resistance are presented.

Key words: rutting, rolling resistance, snow, peatland, greensword surfaces, forest soils.

АНДРОНОВ Александр Вячеславович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 8345-3722. ORCID: 0000-0002-1035-9231.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ANDRONOV Aleksandr V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Forestry Machinery, Service and Repair of S.M. Kirov St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8345-3722. ORCID: 0000-0002-1035-9231.

194021, Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: andronovalexandr@gmail.com

ТАРАДИН Григорий Сергеевич – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 5247-6595.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: grisha190@mail.ru

TARADIN Grigory S. – PhD (Technical), Associate Professor of Forestry engineering, service and repair department, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5247-6595.

194021, Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: grisha190@mail.ru

БОЛОТИН Даниил Викторович – аспирант кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0008-4015-9661.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: bolotin97@internet.ru

BOLOTIN Daniil V. – PhD student of the Department of Forestry Machinery, Service and Repair of the St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0008-4015-9661.

194021, Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: bolotin97@internet.ru

НИКОНОВ Виталий Сергеевич – аспирант кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: nikonov99@outlook.com

NIKONOV Vitaliy S. – PhD student of the Department of Forestry Machinery, Service and Repair of the St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: nikonov99@outlook.com

ПЕТРОСЯН Сурен Сергеевич – аспирант кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. ORCID: 0009-0007-6224-9900.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: surik1622@gmail.com

PETROSYAN Suren S. – PhD student of the Department of Automation, Metrology and Management in Technical Systems of the St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0009-0007-6224-9900.

194021, Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: surik1622@gmail.com

ИГОТТИ Марта Михайловна – аспирант кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: m.igotti@mail.ru

IGOTTI Marta M. – PhD student of the Department of Automation, Metrology and Management in Technical Systems of the St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: m.igotti@mail.ru

БОЖБОВ Владимир Евгеньевич – доцент кафедры геодезии, землеустройства и кадастров Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0003-0881-2911. SPIN-код: 1820-4686.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: v-b@mail.ru

BOZHBOV Vladimir E. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Geodesy, Land Management and Cadastre of the St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0003-0881-2911. SPIN-code: 1820-4686.

194021, Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: v-b@mail.ru

Д.М. Ласточкин, Ю.Н. Сидыганов, В.И. Кретинин, Д.В. Костромин

АНАЛИЗ КОНСТРУКЦИИ МЕХАНИЗМА ВИБРАЦИИ С ПРОТИВОВЕСОМ ЗАХВАТНО-СРЕЗАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Введение. Лесозаготовительная техника и ее технологическое оборудование в процессе эксплуатации подвергаются воздействию значительных динамических нагрузок [Александров, 2020; Александров, Ржавцев, 2021]. Для минимизации негативного воздействия нагрузок конструкции лесозаготовительных машин и технологического оборудования постоянно исследуются и совершенствуются [Александров, 2000; Сидыганов и др., 2008; Онучин, Рябинин, 2012; Ширнин, Ширнин, 2014]. Особенно такие исследования важны для технических систем, не получивших широкого распространения и находящихся на стадии НИОКР. К таким разработкам можно отнести конструкцию захватно-срезающего устройства (ЗСУ), особенностью которой является механизм вибрации, обеспечивающий динамическую стабилизацию вертикально удерживаемого дерева [Ласточкин и др., 2023; Ласточкин и др., 2024]. При работе механизма вибрации создаются вертикальные колебания точки подвеса ЗСУ, что в итоге приводит к появлению неуравновешенных сил и моментов сил, вызывающих дополнительный расход мощности на колебания и дополнительные нагрузки на элементы конструкции. Поэтому уравнивание возникающих сил и моментов сил является одной из главных задач при анализе конструкции механизма вибрации ЗСУ.

Целью работы является анализ конструкции механизма вибрации ЗСУ, оснащенного противовесом, обеспечивающим уравнивание возникающих сил и моментов сил.

Материалы и методика исследования. Ранее проведенный анализ конструкции ЗСУ с механизмом вибрации показал, что повышение частоты колебаний приводит к достаточно неравномерному движению конструкции из-за появления неуравновешенных сил и моментов сил [Ласточкин и др., 2024]. В связи с этим для стабилизации возвратно-поступательного движения ЗСУ с вертикально удерживаемым деревом в конструкции механизма вибрации было предложено использовать противовес, который должен полностью или частично уравнивать возникающие силы и создаваемые ими моменты.

В результате конструктивной проработки была предложена компоновка механизма вибрации, основными элементами которой являются противовес, кривошип, шатун и движитель (рис. 1).

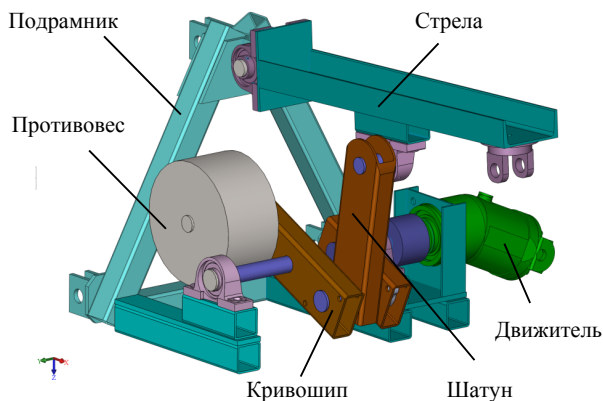


Рис. 1. 3D-модель механизма вибрации с противовесом
Fig. 1. 3D model of the vibration mechanism with counterweight

При разработке конструкции выбор формы и размеров противовеса определялся конструктивными особенностями механизма вибрации. А для определения массы противовеса необходимо знать массу движущихся частей механизма вибрации и силы инерции, которые он должен компенсировать.

Так как конструкция механизма вибрации совершает сложные возвратно-поступательные движения, то масса противовеса будет состоять из суммы масс $m_{пр}$ и $m_{пс}$, уравнивающих силы инерции вращающихся и возвратно-поступательных масс m_r и m_s механизма вибрации:

$$m_{пр} = m_{пр} + m_{пс}. \quad (1)$$

При рассмотрении движения конструкции механизма вибрации с противовесом можно сказать, что кривошип противовеса совершает только вращательное движение, а шатун механизма вибрации совершает сложное плоскопараллельное движение: возвратно-поступательное вместе со стрелой, вращательное вместе с кривошипом и колебательное вокруг оси соединительного шатуна со стрелой и с кривошипом. Если учитывать все эти движения элементов механизма вибрации, то расчет масс и соответствующих сил инерции достаточно затруднителен. В связи с этим была упрощена неоднородная масса шатуна, контактирующая с разными элементами конструкции путем разбивки на две части: m_1 – масса, сосредоточенная в точке соединения шатуна со стрелой; m_2 – масса, сосредоточенная в точке соединения шатуна с кривошипом. Так как масса шатуна $m_{ш}$ и сумма приведенных масс m_1 и m_2 равны, то с достаточной точностью и для упрощения расчета можно считать $m_1 = m_2 = 0,5 m_{ш}$.

Масса поступательно движущихся частей механизма вибрации m_s состоит из массы ЗСУ с удерживаемым деревом, части массы стрелы и части массы шатуна m_1 , которая сосредоточена на оси соединения со стрелой и совершает возвратно-поступательное движение. Так как стрела одним концом опирается на подрамник, то для расчета возьмём значение половины его массы.

В итоге масса поступательно движущихся частей механизма вибрации равна:

$$m_s = m_d + m_{ст} + \frac{1}{2}m_{стр} + \frac{1}{2}m_{ш} + m_{доп}, \quad (2)$$

где m_d – масса дерева; $m_{ст}$ – масса стойки ЗСУ; $m_{стр}$ – масса стрелы; $m_{ш}$ – масса шатуна; $m_{доп}$ – дополнительная масса (крепежные элементы, соединительные пальцы и др.).

Для вычисления массы поступательно движущихся частей зададим значения масс его элементов, которые возьмём из 3D-модели механизма вибрации ЗСУ (рис. 1): $m_{ш} = 3,1$ кг; $m_d = 50$ кг; $m_{ст} = 50,5$ кг; $m_{стр} = 33,4$ кг; $m_{доп} = 8$ кг (1...5% от массы ЗСУ).

После подстановки исходных данных в уравнение (2) масса поступательно движущихся частей, сосредоточенная в месте соединения шатуна со стрелой, будет иметь следующее значение:

$$m_s = 50 + 50,5 + \frac{1}{2}33,4 + \frac{1}{2}3,1 + 8 = 126,75 \text{ кг.}$$

Масса вращающихся частей механизма вибрации m_r состоит из массы кривошипа, массы части шатуна, сосредоточенной на оси соединения с кривошипом, и массы приводного рычага от движителя:

$$m_r = \frac{1}{2}m_{ш} + m_{крш} + m_o + m_{пд} + m_{рыч}, \quad (3)$$

где $m_{ш}$ – масса шатуна; $m_{крш}$ – масса кривошипа; m_o – масса оси соединения кривошипа и шатуна; $m_{пд}$ – масса подшипника внутри шатуна и его крепления; $m_{рыч}$ – масса приводного рычага от движителя.

Исходные данные для расчета массы вращающихся частей возьмём из 3D-модели механизма вибрации ЗСУ (рис. 1): $m_{ш} = 3,1$ кг; $m_{крш} = 2,32$ кг; $m_o = 1,38$ кг; $m_{пд} = 0,2$ кг; $m_{рыч} = 3,1$ кг.

После подстановки исходных данных в уравнение (3) масса вращающихся частей механизма вибрации будет иметь следующее значение:

$$m_r = \frac{1}{2}3,1 + 2,32 + 1,38 + 0,2 + 3,1 = 7,55 \text{ кг.}$$

Определив значения вращающихся и поступательно движущихся масс элементов механизма вибрации, можно вычислить массу противовеса, уравнивающего соответствующие силы инерции.

Силы инерции масс, вращающихся с угловой скоростью ω , полностью уравниваются противовесом массой $m_{\text{пр}}$ при условии $m_{\text{пр}} r_{\text{пр}} \omega^2 = m_r r \omega^2$. Тогда масса, компенсирующая силы инерции вращающихся элементов механизма вибрации, будет иметь следующий вид:

$$m_{\text{пр}} = m_r \frac{r}{r_{\text{пр}}}, \quad (4)$$

где r – радиус кривошипа; $r_{\text{пр}}$ – радиус рычага противовеса.

Полное уравнивание сил инерций поступательно движущихся масс возможно за счет использования двух пар противовесов, вращающихся навстречу друг другу по методу Ланчестера [Прокофьев и др., 2019]. Но данный способ требует серьёзного изменения конструкции механизма вибрации, что в рассматриваемом варианте нецелесообразно. Поэтому в современной практике при расчетах кривошипно-шатунных механизмов полное уравнивание сил инерции поступательно движущихся масс не применяется. В связи с этим для определения массы противовеса, компенсирующего силы инерции поступательно движущихся масс механизма вибрации, с достаточной точностью можно использовать выражение [Гоц, 2014; Прокофьев и др., 2019; Мелентьев и др., 2023]:

$$m_{\text{прс}} = 0,5 m_s \frac{r}{r_{\text{пр}}}, \quad (5)$$

где коэффициент 0,5 – отношение $\frac{m_{\text{прс}} r_{\text{пр}} \omega^2}{m_s r \omega^2}$, которое является составляющей центробежной силы инерции от противовеса относительно максимальной силы инерции поступательно движущихся масс первого порядка.

В большинстве случаев отношение $\frac{m_{\text{прс}} r_{\text{пр}} \omega^2}{m_s r \omega^2}$ меняется от 0 до 1. При частичном уравнивании, когда отношение $\frac{m_{\text{прс}} r_{\text{пр}} \omega^2}{m_s r \omega^2} = 0,5$, суммарная неуравновешенная сила будет постоянна по величине и скорости ω , что является достаточно оптимальным условием уравнивания.

После определения масс, компенсирующих силы инерции вращающихся и поступательно движущихся масс механизма вибрации, уравнение для определения общей массы противовеса можно записать следующим образом:

$$m_{\text{пр}} = m_{\text{пр}r} + m_{\text{пр}с} = m_r \frac{r}{r_{\text{пр}}} + \frac{1}{2} m_s \frac{r}{r_{\text{пр}}} = \left(m_r + \frac{1}{2} m_s \right) \frac{r}{r_{\text{пр}}}. \quad (6)$$

Для вычисления общей массы противовеса с учетом разработанной 3D-модели механизма вибрации ЗСУ (рис. 1) зададим значение радиуса кривошипа $r = 126$ мм и радиус рычага противовеса $r_{\text{пр}} = 175$ мм. После подстановки полученных ранее значений m_r и m_s в уравнение (6) общая масса противовеса механизма вибрации ЗСУ будет иметь следующее значение:

$$m_{\text{пр}} = \left(7,55 + \frac{1}{2} 126,75 \right) \frac{126}{175} = 51,11 \text{ кг}.$$

После вычисления массы противовеса необходимо определить его размеры, которые можно рассчитать через его объем. Для этого зададим материал противовеса – конструкционная углеродистая сталь Ст3 плотностью $\rho = 7850 \text{ кг/м}^3$. Далее, поделив массу противовеса на плотность материала, определили объем противовеса, равный $0,00651 \text{ м}^3$. В результате полученных вычислений параметры противовеса и элементов механизма вибрации отобразим на рис. 2.

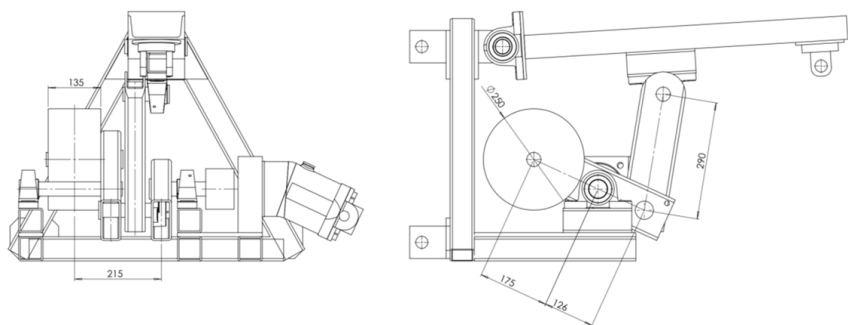


Рис. 2. Основные размеры механизма вибрации ЗСУ
Fig. 2. Main dimensions of the vibration mechanism of the ZSU

Для того чтобы оценить эффективность применения противовеса в механизме вибрации ЗСУ, было проведено моделирование момента на дви-

жителе и сравнение значений с результатами моделирования, полученными на механизме вибрации без противовеса [Ласточкин и др., 2024]. Моделирование момента на движителе было проведено в программе SolidWorks Motion на разработанной конструкции механизма вибрации (рис. 1). Для упрощения исследования стойка ЗСУ с удерживаемым деревом были заменены на соответствующие значения силы.

Результаты исследования. В результате анализа конструкции механизма вибрации, оснащенного противовесом, было проведено моделирование момента на движителе и сравнение значений с результатами моделирования, полученными на механизме вибрации без противовеса для дерева массой 50 кг при скорости вращения движителя 150 об/мин (рис. 3).

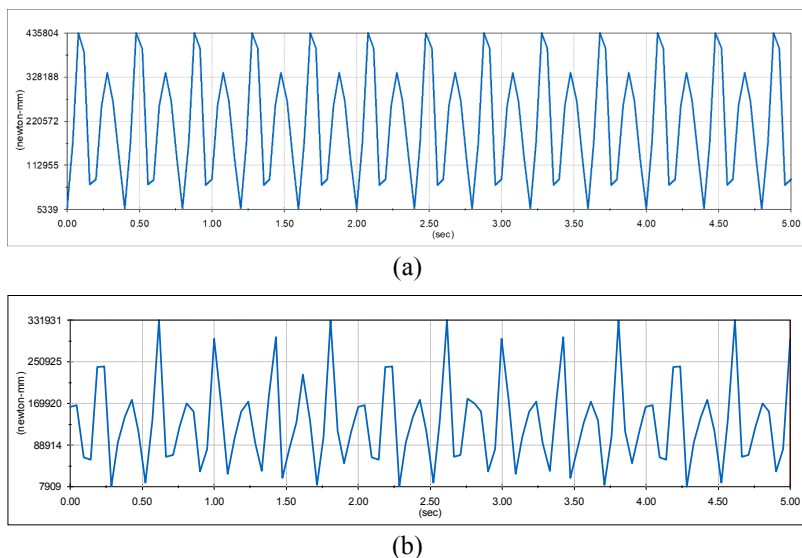


Рис. 3. Момент на валу движителя механизма вибрации:
(a) без противовеса, (b) с противовесом

Fig. 3. Moment on the shaft of the vibration mechanism drive:
(a) without counterweight, (b) with counterweight

Сравнение результатов моделирования момента на движителе механизма вибрации при равных условиях показало, что максимальный момент на валу без противовеса составляет 435804 Н·мм, а максимальный момент

на валу с противовесом равен 331931 Н·мм. Разница в значениях максимальных моментов на валу двигателя механизма вибрации составляет 23,8%, что говорит нам о достаточной эффективности применения противовеса для уравнивания возникающих сил и моментов в конструкции.

Заключение. В результате проведенного анализа был предложен вариант повышения эффективности работы механизма вибрации ЗСУ за счет применения противовеса, обеспечивающего уравнивание возникающих сил и моментов сил в процессе динамического удержания вертикального дерева на осциллирующем подвесе.

Моделирование момента на валу двигателя механизма вибрации при частоте вращения 150 об/мин показало, что применение противовеса на 23,8% снижает максимальный возникающий момент. Такая эффективность уравнивания возникающих сил и моментов в конструкции механизма вибрации за счет применения противовеса позволяет при практической реализации захватно-срезающего устройства для динамической стабилизации вертикально удерживаемого дерева использовать более широкий диапазон высокомоментных гидродвигателей.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 23-29-00421.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Александров В.А. Механизация лесосечных работ в России: монография. СПб.: ЛТА, 2000. 208 с.

Александров В.А. Нагруженность валочно-пакетирующих машин на лесозаготовках. СПб.: СПбГЛТУ, 2020. 295 с.

Александров В.А., Ржавцев А.А. Нагруженность лесосечных машин на лесозаготовках. СПб.: СПбГЛТУ, 2021. 256 с.

Гоц А.Н. Кинематика и динамика кривошипно-шатунного механизма поршневых двигателей. Владимир: Изд-во ВлГУ, 2014. 142 с.

Ласточкин Д.М., Медяков А.А., Остащенко А.П. Патент 2023111991 РФ, Захватно-срезающее устройство № 2810547 / Оpubл. 27.12.2023. Бюл. № 36.

Ласточкин Д.М., Сидыганов Ю.Н., Кретинин В.И., Багаутдинов И.Н. Исследование движения элементов вибропривода захватно-срезающего устройства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 248. С. 220–229. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.220-229

Мелентьев В.С., Сычуглов С.Ю., Родионов Л.В., Рекадзе П.Д. Критерий подбора массы противовеса кривошипно-шатунного механизма // Вестник машиностроения. 2023. № 9. С. 741-746. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-9-741-746

Онучин Е.М., Рябинин Д.Е. Умные машины придут в лес: монография. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2012. 116 с.

Прокофьев Г.Ф., Кабакова М.Ю., Цветкова Т.В. Применение современных методов конструирования при совершенствовании лесопильных станков // ИВУЗ. Лесной журнал. 2019. № 1 (367). С. 128–140. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.128

Сидыганов Ю.Н., Онучин Е.М., Ласточкин Д.М. Модульные машины для рубок ухода и лесовосстановления: монография. Йошкар-Ола: МарГТУ, 2008. 336 с.

Ширнин Ю.А., Ширнин А.Ю. Разработка параметров оборудования и технологии для экспериментальных условий лесозаготовок: монография. Йошкар-Ола: ПГТУ, 2014. 232 с.

References

Aleksandrov V.A. Mechanization of logging operations in Russia: monograph. St. Petersburg: LTA, 2000. 208 p. (In Russ.)

Aleksandrov V.A. Loading of feller-buncher machines in logging. St. Petersburg: LTA, 2020. 295 p. (In Russ.)

Aleksandrov V.A., Rzhavcev A.A. Loading of logging machines in logging operations. St. Petersburg: LTA, 2021. 256 p. (In Russ.)

Gots A.N. Kinematics and dynamics of the crank mechanism of piston engines. Vladimir: VISU, 2014. 142 p. (In Russ.)

Lastochkin D.M., Medyakov A.A., Ostashenkov A.P. Patent 2023111991 RU, Zakhvatno-srezayushcheye ustroystv [Grabbing and cutting device]. Publ. 27.12.2023; bul. no. 36. (In Russ.)

Lastochkin D.M., Sidiganov Yu.N., Cretinin V.I., Bagautdinov I.N. Study of the movement of vibration drive elements of a gripping-cutting device. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicheskoj Akademii*, 2024, iss. 248, pp. 220–229. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.248.220-229. (In Russ.)

Melentyev V.S., Sychugov S.Yu., Rodionov L.V., Rekadze P.D. A criterion for selecting the mass of the counterweight of the crank mechanism. *Vestnik mashinostroenija [Russian Engineering Research]*, 2023, no. 9, pp. 741–746. DOI: 10.36652/0042-4633-2023-102-9-741-746 (In Russ.)

Onuchin E.M., Ryabinin D.E. Smart cars will come to the forest: a monograph. Yoshkar-Ola: PGU, 2012. 116 p. (In Russ.)

Prokofiev G.F., Kabakova M.Yu., Tsvetkova T.V. The Use of Modern Design Methods in Saw Machine Development. *IVUZ. Lesnoy Zhurnal [Forestry Journal]*, 2019, iss. 1 (367), pp. 128–140. DOI: 10.17238/issn0536-1036.2019.1.128. (In Russ.)

Sidiganov Yu.N., Onuchin E.M., Lastochkin D.M. Modular machines for thinning and reforestation: monograph. Yoshkar-Ola: MarGTU, 2008. 336 p. (In Russ.)

Shirnin Yu.A., Shirnin A.Yu. Development of equipment parameters and technology for experimental logging conditions: monograph. Yoshkar-Ola: PGU, 2014. 232 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 13.04.2024

Ласточкин Д.М., Сидыганов Ю.Н., Кретинин В.И., Костромин Д.В.
Анализ конструкции механизма вибрации с противовесом захватно-срезающего устройства // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 260–270. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.260-270

В статье проведен анализ конструкции механизма вибрации с противовесом захватно-срезающего устройства, обеспечивающего уравнивание возникающих сил и моментов сил. Выполнена конструктивная проработка механизма вибрации захватно-срезающего устройства путем добавления одного противовеса, который обеспечивает требуемую разгрузку опор от неуравновешенных масс механизма вибрации. Для проведения анализа конструкции механизма вибрации с противовесом была определена масса противовеса путем расчета поступательно движущихся и вращающихся частей механизма. На разработанной 3D-модели конструкции механизма вибрации с противовесом были проведены динамические исследования в программе SolidWorks Motion. В результате анализа конструкции механизма вибрации, оснащенного противовесом, было проведено моделирование момента на двигателе и сравнение значений с результатами моделирования, полученными на механизме вибрации без противовеса для дерева массой 50 кг и при скорости вращения двигателя 150 об/мин. Сравнение результатов моделирования момента на двигателе механизма вибрации при равных условиях показало, что максимальный момент на валу без противовеса составляет 435804 Н·мм, а максимальный момент на валу с противовесом равен 331931 Н·мм. Разница в значениях максимальных моментов на валу двигателя механизма вибрации показала, что применение противовеса на 23,8% снижает максимальный возникающий момент.

Ключевые слова: механизм вибрации, противовес, захватно-срезающее устройство, динамическая стабилизация, вертикальное дерево, лесозаготовка.

Lastochkin D.M., Sidiganov Yu.N., Cretinin V.I., Kostromin D.V. Analysis of the design of the vibration mechanism with a counterweight of the gripping-cutting device. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnicoskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 260–270 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.260-270

The article analyzes the design of the vibration mechanism with a counterweight of the gripping-cutting device, which ensures the balancing of the resulting forces and moments of forces. The design development of the vibration mechanism of the gripping-cutting device was performed by adding one counterweight, which will provide the required unloading of the supports from the unbalanced masses of the vibration mechanism. To analyze the design of the vibration mechanism with a

counterweight, the mass of the counterweight was determined by calculating the translational moving and rotating parts of the mechanism. Dynamic studies were carried out in the SolidWorks Motion program on the developed 3D model of the vibration mechanism design with a counterweight. As a result of the analysis of the design of the vibration mechanism equipped with a counterweight, the moment on the mover was simulated and the values compared with the simulation results obtained on the vibration mechanism without a counterweight for a tree weighing 50 kg and at a rotation speed of the mover of 150 rpm. Comparison of the results of modeling the torque on the vibration mechanism drive under equal conditions showed that the maximum torque on the shaft without a counterweight is 435804 N mm, and the maximum torque on the shaft with a counterweight is 331931 N mm. The difference in the values of the maximum torques on the vibration mechanism drive shaft showed that the use of a counterweight reduces the maximum torque by 23.8%.

Keywords: vibration mechanism, counterweight, gripping-cutting device, dynamic stabilization, vertical tree, forest harvesting.

ЛАСТОЧКИН Денис Михайлович – доцент кафедры эксплуатации машин и оборудования Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 7597-7487. ORCID: 0000-0002-0442-384X.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия.
E-mail: lastochkindm@volgatech.net

LASTOCHKIN Denis M. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Machinery and Equipment Operation of the Volga State University of Technology. SPIN-code: 7597-7487. ORCID: 0000-0002-0442-384X.

424000. Lenina sqr. 3. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: lastochkindm@volgatech.net

СИДЫГАНОВ Юрий Николаевич – профессор кафедры эксплуатации машин и оборудования Поволжского государственного технологического университета, доктор технических наук, профессор. SPIN-код: 5527-9829. ORCID: 0000-0003-3665-5431.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия.
E-mail: SidyganovYN@volgatech.net

SIDIGANOV Yury N. – DSc (Technical), Professor of the Department of Operation of Machines and Equipment of the Volga State Technological University. SPIN-code: 5527-9829. ORCID: 0000-0003-3665-5431.

424000. Lenina sqr. 3. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: SidyganovYN@volgatech.net

КРЕТИНИН Виктор Иванович – доцент кафедры автоматизации, метрологии и управления в технических системах Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 4424-8046. ORCID: 0000-0003-0467-4080.

194021, Институтский пер. д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: KVI_1960@mail.ru

KRETININ Viktor I. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Automation, Metrology and Control in Technical Systems, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 4424-8046. ORCID: 0000-0003-0467-4080.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: KVI_1960@mail.ru

КОСТРОМИН Денис Владимирович – заведующий кафедрой эксплуатации машин и оборудования Поволжского государственного технологического университета, кандидат технических наук, доцент. SPIN-код: 6948-5157. ORCID: 0000-0001-6190-0799.

424000, пл. Ленина, д. 3, г. Йошкар-Ола, Республика Марий Эл, Россия. E-mail: KostrominDV@volgatech.net

KOSTROMIN Denis V. – PhD (Technical), Head of the Department of Machinery and Equipment Operation of the Volga State University of Technology. SPIN-code: 6948-5157. ORCID: 0000-0001-6190-0799

424000. Lenina sq. 3. Yoshkar-Ola. Republic of Mari El. Russia. E-mail: KostrominDV@volgatech.net

Р.А. Шадрин, С.А. Угрюмов, И.К. Козлова

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ПОРУБОЧНЫХ ОСТАТКОВ
В БИОТЕХНИЧЕСКИХ ЦЕЛЯХ В УСЛОВИЯХ ЛЕСНИЧЕСТВ
СЕВЕРО-ЗАПАДА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**

Введение. В современных условиях проблема взаимодействия лесного хозяйства, лесной промышленности и охотничьего хозяйства характеризуется особой актуальностью. Взаимосвязь между этими отраслями экономики и необходимость координации хозяйственной деятельности определяются, в том числе, тем, что использование лесов (в первую очередь, для заготовки древесины) и ведение охотничьего хозяйства (осуществление видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства) производятся на одной и той же территории лесного фонда.

При этом в результате лесосечных работ при проведении рубок спелых и перестойных лесных насаждений, рубок ухода за лесом, лесокультурных и других работ условия обитания лесных зверей и птиц могут существенно изменяться, что, в свою очередь, обусловит изменения в видовом составе, динамике численности и стациальном распределении лесной фауны. Это обстоятельство придётся учитывать уже при ведении охотничьего хозяйства.

Напомним, что лес – это элемент географического ландшафта, состоящий из совокупности деревьев, занимающих доминирующее положение, кустарников, напочвенного покрова, животных и микроорганизмов, в своем развитии биологически взаимосвязанных, влияющих друг на друга и на внешнюю среду [Терминологический..., 1993]. Поэтому нельзя забывать обо всех его компонентах, в том числе, и о лесной фауне.

В работе Данилкина А.А. [2006] отмечается: «В принципе, любые лесные рубки, посадки, рекультивации или реконструкции малоценных насаждений должны преследовать и биотехнические цели».

Что же такое биотехния, биотехнические цели, биотехнические мероприятия? Зачем они нужны? Для чего, например, студентам, обучающимся по профилю «Лесоинженерное дело» или «Организация и управление лесопромышленным производством» направления 35.03.02 «Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств» знать об

этом? Ответы на эти и другие вопросы получены в результате настоящего научного исследования, для чего необходимо было обратиться, в том числе, к работам классиков лесоведения, лесоводства и охотоведения, а также к нормативно-методическим документам по данной теме.

Цель и задачи исследования. Целью настоящего исследования является обоснование необходимости использования порубочных остатков в биотехнических целях как элемента технологии лесозаготовительных производств в контексте влияния на экологию леса и лесовосстановление, а также в анализе практики использования порубочных остатков в биотехнических целях в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации.

Задачи исследования:

- изучить современную нормативно-методическую основу биотехнических мероприятий, а также использования лесов для ведения охотничьего хозяйства (для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства);
- изучить современную нормативно-методическую основу лесосечных работ, в том числе, очистки лесосек, а также использования порубочных остатков в биотехнических целях;
- проанализировать практику очистки лесосек и использования порубочных остатков в биотехнических целях в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации;
- на основании этого анализа определить способы очистки лесосек, позволяющие использовать порубочные остатки в биотехнических целях, в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации;
- выявить технологические особенности применения способов очистки лесосек, позволяющих использовать порубочные остатки в биотехнических целях, применительно к условиям лесозаготовительных предприятий Северо-Запада Российской Федерации;
- определить направление дальнейших научных исследований в отношении применения способов очистки лесосек, позволяющих использовать порубочные остатки в биотехнических целях, как части мероприятий по охране объектов животного мира и среды их обитания и интеграции таких мероприятий в систему технологий лесозаготовительного производства.

Материалы и методика исследования. Методической основой настоящего исследования послужили следующие нормативно-методические документы:

1. Лесной кодекс Российской Федерации № 200-ФЗ от 04.12.2006 (ред. от 04.08.2023), (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.01.2024);

2. Приказ Минприроды России № 993 от 01.12.2020 (ред. от 17.10.2022) «Об утверждении Правил заготовки древесины и особенностей заготовки древесины в лесничествах, указанных в статье 23 Лесного кодекса Российской Федерации»;

3. Приказ Минприроды России № 534 от 30.07.2020 «Об утверждении Правил ухода за лесами»;

4. Приказ Минприроды России № 23 от 17.01.2022 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки»;

5. Распоряжение Правительства РФ № 1283-р от 17.07.2012 (ред. от 10.09.2021) «Об утверждении Перечня объектов лесной инфраструктуры для защитных лесов, эксплуатационных лесов и резервных лесов»;

6. Приказ Минприроды России № 565 от 05.08.2020 «Об утверждении Порядка проектирования, создания, содержания и эксплуатации объектов лесной инфраструктуры»;

7. Приказ Минприроды России № 1024 от 29.12.2021 (ред. от 03.08.2023) «Об утверждении Правил лесовосстановления, формы, состава, порядка согласования проекта лесовосстановления, оснований для отказа в его согласовании, а также требований к формату в электронной форме проекта лесовосстановления»;

8. Постановление Правительства РФ № 1614 от 07.10.2020 «Об утверждении Правил пожарной безопасности в лесах»;

9. Постановление Правительства РФ № 2047 от 09.12.2020 «Об утверждении Правил санитарной безопасности в лесах»;

10. Постановление Правительства РФ № 1509 от 21.09.2020 (ред. от 08.06.2022) «Об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения» (вместе с «Положением об особенностях использования, охраны, защиты, воспроизводства лесов, расположенных на землях сельскохозяйственного назначения») (с изменениями и дополнениями, вступившими в силу с 01.01.2024);

11. Приказ Минприроды России № 661 от 12.12.2017 (ред. от 29.10.2020) «Об утверждении Правил использования лесов для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства и Перечня случаев использования лесов для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства без предоставления лесных участков»;

12. Приказ Минприроды России № 560 от 24.12.2010 (ред. от 25.09.2020) «Об утверждении видов и состава биотехнических мероприятий, а также порядка их проведения в целях сохранения охотничьих ресурсов».

Кроме того, в настоящем исследовании были использованы материалы обследования лесосек в Киришском лесничестве Ленинградской области и в Боровичском лесничестве Новгородской области РФ.

Результаты исследования. Биотехния – наука, изучающая влияние деятельности человека на зверей и птиц и разрабатывающая меры направленного воздействия с целью повышения численности животных и улучшения их качества [Данилов, 1966].

Биотехнические мероприятия проводятся с целью увеличения численности диких зверей и птиц как объектов охоты посредством улучшения кормовых, гнездопригодных и защитных свойств охотничьих угодий, при помощи подкормки охотничьих животных в трудные периоды года и снижения численности хищников и конкурентов, ослабления негативного антропогенного воздействия, а также выпуска в угодья зверей и птиц в целях их акклиматизации и реакклиматизации.

Как в научной, так и в учебной литературе по лесоведению, лесоводству, охотоведению, зоологии, экологии отмечается большое значение фауны для леса [Кузнецов, 1967; Мелехов, 1980; Данилов, 2017; Никонов, 2022; Сеннов, 2022].

Изучение современной нормативно-методической основы биотехнических мероприятий, а также использования лесов для ведения охотничьего хозяйства (для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства) было начато с Приказа Минприроды России № 560 от 24.12.2010 (ред. от 25.09.2020) «Об утверждении видов и состава биотехнических мероприятий, а также порядка их проведения в целях сохранения охотничьих ресурсов», в котором определены виды биотехнических мероприятий, проводимых в охотничьих угодьях, в том числе:

2.2. Подкормка охотничьих ресурсов и улучшение кормовых условий среды их обитания (выкладка кормов; создание искусственных водоемов; создание сооружений для выкладки кормов; устройство кормовых полей);

2.3. Улучшение условий защиты и естественного воспроизводства охотничьих ресурсов (создание защитных посадок растений; устройство искусственных мест размножения, жилищ, укрытий охотничьих ресурсов; создание искусственных водоемов).

Согласно Правилам использования лесов для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства (утверждённым Приказом Минприроды России № 661 от 12.12.2017):

2. Настоящие Правила распространяются на юридические лица, индивидуальных предпринимателей, использующих леса для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства на основании охотхозяйственных соглашений с предоставлением или без предоставления лесных участков.

3. Использование лесов для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства без предоставления лесных участков допускается, если осуществление указанных видов деятельности не влечет за собой проведение рубок лесных насаждений или создание объектов охотничьей инфраструктуры.

Перечень случаев использования лесов для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства без предоставления лесных участков (утверждённый Приказом Минприроды России № 661 от 12.12.2017) включает, в том числе, такой случай:

8. Организация осуществления биотехнических мероприятий, предусмотренных Федеральным законом от 24.07.2009 № 209-ФЗ «Об охоте и о сохранении охотничьих ресурсов и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

Анализируя вышеприведённый нормативный документ, авторы пришли к выводу, что проводить (осуществлять) биотехнические мероприятия без предоставления лесных участков охотпользователю можно, но рубить при этом ничего нельзя. Это обстоятельство объясняет важность не только использования порубочных остатков в биотехнических целях, но и обосновывает необходимость и значимость биотехнических целей рубок лесных насаждений в целом.

Изучение современной нормативно-методической основы лесосечных работ было начато со статьи 23.2. «Лесосечные работы» Лесного кодекса Российской Федерации (№ 200-ФЗ от 04.12.2006).

Согласно требованиям п. 10 этой статьи был принят Приказ Минприроды России № 23 от 17.01.2022 «Об утверждении видов лесосечных работ, порядка и последовательности их выполнения, формы технологической карты лесосечных работ, формы акта заключительного осмотра лесосеки и порядка заключительного осмотра лесосеки».

Виды лесосечных работ, порядок и последовательность их выполнения в отношении очистки лесосек содержат следующую информацию:

8. Заключительные лесосечные работы представляют собой очистку лесосек и снос объектов лесной инфраструктуры. К заключительным лесосечным работам относятся следующие работы:

- 1) очистка (доочистка) мест рубок от порубочных остатков;
- 2) снос созданных лесных складов, других строений и сооружений;
- 3) приведение в состояние, пригодное для использования по назначению, лесных дорог, имевшихся до осуществления лесосечных работ;
- 4) приведение в надлежащее состояние нарушенных мостов, просек, водотоков, ручьев, рек.

Очистка мест рубок от порубочных остатков осуществляется следующими способами:

- укладкой порубочных остатков на волок с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;
- сбором порубочных остатков в кучи и валы с последующим сжиганием их в пожаробезопасный период;
- сбором порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период;
- разбрасыванием измельченных порубочных остатков в целях улучшения лесорастительных условий;
- укладкой и оставлением на перегнивание порубочных остатков на месте рубки;
- вывозом порубочных остатков в места их дальнейшей переработки.

Указанные способы очистки мест рубок при необходимости могут применяться комбинированно.

После проведения указанных работ допускается доочистка лесосек. Очистка лесосек от порубочных остатков должна осуществляться с соблюдением требований Правил пожарной безопасности в лесах и Правил санитарной безопасности в лесах.

Очистка лесосек сплошных рубок с последующим искусственным лесовосстановлением должна производиться способами, обеспечивающими создание условий для проведения всего комплекса лесовосстановительных работ (подготовка участка и обработка почвы, посадка или посев лесных культур, агротехнические уходы), а также ухода за молодняками.

Очистка лесосек сплошных рубок с наличием подроста ценных пород должна осуществляться способами, обеспечивающими его сохранность. При трелевке деревьев с кронами сжигание порубочных остатков должно производиться по мере их накопления на специально подготовленных площадках. Сжигание порубочных остатков сплошным палом не допускается.

Обязательному сжиганию подлежат порубочные остатки при проведении санитарных рубок в очагах вредных организмов, в которых они могут оказаться источником распространения инфекции или средой для ее со-

хранения и заселения вторичными вредными организмами, если такие порубочные остатки не вывозятся в места их дальнейшей переработки.

На рис. 1 представлены результаты очистки лесосеки способом укладки порубочных остатков на волокни с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке. Но на данном рисунке чётко видно, что порубочные остатки осины послужили кормом лосю и зайцу-беляку. Таким образом, данный способ очистки лесосек подходит для биотехнических целей.



Рис. 1. Порубочные остатки осины послужили кормом лосю и зайцу-беляку
Fig. 1. The felled remains of aspen served as food for moose and hare

Кроме вышеназванного способа, безусловно, для биотехнических целей также пригодны такие способы очистки лесосек, как сбор порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период и укладка и оставление на перегнивание порубочных остатков на месте рубки.

Для анализа практики очистки лесосек и использования порубочных остатков в биотехнических целях и определения на основании этого анализа способов очистки лесосек, позволяющих использовать порубочные остатки в биотехнических целях, а также для обозначения технологических особенностей применения способов очистки лесосек, позволяющих использовать порубочные остатки в биотехнических целях применительно к условиям лесозаготовительных предприятий Северо-Запада Российской Федерации, в настоящем исследовании были использованы материалы обследования лесосек разработки зимы 2023-2024 гг. в Киришском лесничестве Ленинградской области и в Боровичском лесничестве Новгородской области РФ (табл. 1).

Таблица 1

Результаты обследования лесосек
The results of inspection of cutting areas

Месторасположение лесосеки	Применённые способы очистки мест рубок
Киришское лесничество, Пчевжинское участковое лесничество, кв. 187, выд. 17	– укладка порубочных остатков на волокни с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;
Киришское лесничество, Пчевжинское участковое лесничество, кв. 135, выд. 31, 32, 34, 35	– сбор порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период; – укладка и оставление на перегнивание порубочных остатков на месте рубки
Боровичское лесничество, Боровичское участковое лесничество, кв. 208, выд. 38.1	– укладка порубочных остатков на волокни с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;
Боровичское лесничество, Волосское участковое лесничество, кв. 151, выд. 11, 15	– сбор порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период

Таким образом, из табл. 1 следует, что наиболее распространёнными способами очистки лесосек, также пригодными и для биотехнических целей, служат комбинированно применяемые способы:

– укладка порубочных остатков на волокни с целью их укрепления и предохранения почвы от сильного уплотнения и повреждения при трелевке;

- сбор порубочных остатков в кучи и валы с оставлением их на месте для перегнивания и для подкормки диких животных в зимний период;
- укладка и оставление на перегнивание порубочных остатков на месте рубки.

При обследовании лесосек повсеместно отмечается использование в качестве корма порубочных остатков осины и ивы зайцами и порубочных остатков сосны обыкновенной, осины и ивы лосями, что объясняется кормовой ценностью этих остатков.

В осенне-зимний период для многих лесных копытных основным источником пищи становятся зимнезелёные полукустарнички (брусника, черника, голубика, вереск), древесные и наземные лишайники, осоки, хвощи и побеги хвойных пород, прежде всего сосны, – т. е. растения, содержащие наибольшее количество воды. Побеги хвойных деревьев и зимнезелёных полукустарничков содержат в тканях наибольшее количество незамерзшей воды. Потребляя эту воду, животные экономят энергию при ее нагревании до температуры своего тела. Лось, съедая 10 кг хвои сосны при температуре -10°C, когда в ней содержится около 40% незамерзшей воды, затрачивает в среднем 150 ккал тепла на нагревание сухого вещества, 240 ккал – на плавление льда и 235 ккал – на нагревание воды до температуры своего тела. Большая часть энергозатрат (76%) при этом приходится на плавление льда (38,4%) и нагревание воды. Очевидно, что животным в энергетическом отношении невыгодно использовать в пищу растения, не содержащие незамерзшую воду, или использовать в качестве источника воды снег.

Кроме того, немаловажно, что для восполнения энергозатрат зимой предпочтительна обильная, сконцентрированная в одном месте пища. Масса скусанного побега сосны с хвоей в 5-20 раз больше массы листовенного побега. Средняя масса объединённых с одной сосны побегов (до 117 г) на порядок выше, чем при питании побегами листовенных видов деревьев и кустарников (5-11 г с одного дерева). Даже при большей встречаемости в рационе животных побегов листовенных видов деревьев доля сосны в массе потребленной ими пищи часто доминирует, достигая 80%. Следовательно, на получение суточной нормы сосновой пищи лось тратит в 8-10 раз меньше времени, чем при кормежке листовенными породами деревьев, соответственно экономя энергозатраты на добывание пищи [Данилкин, 1999].

Согласно «Указаниям по проектированию охотничьих и лесохозяйственных хозяйств» (Утверждены Заместителем Председателя Госкомлеса СССР Г.Н. Коровиным 31 марта 1989 года, одобрены Техническим советом института «Союзгипролесхоз» 15 августа 1988 года, протокол № 26):

Ведение хозяйства на лося вызывает необходимость практически повсеместно осуществлять определенный комплекс биотехнических мероприятий, направленных как на увеличение кормовой емкости угодий, так и на непосредственную подкормку животных.

Повышение кормовой емкости угодий достигается за счет:

- а) оставления вырубок и гарей под естественное возобновление кормовых лесообразующих пород (сосны, осины, ивы, ясени);
- б) омолаживания старых и затравленных ивняков;
- в) создания специальных кормовых лесонасаждений.

Подкормка лосей производится путем подрубки осины в осенне-зимний сезон. Одна осина диаметром 20 см дает до 30 кг съедобной коры для лося. Подрубка 30 шт. осин ($8-10 \text{ м}^3$) на 1 тыс. га угодий обеспечит до 15% потребности в корме 4 голов в течение 5 месяцев. Подрубку осин следует производить главным образом на лесосеках, назначенных в рубку, в осенне-зимний период. После использования лосем деревья обрубаются, а древесина трелюется (вывозится). Это мероприятие требует значительных затрат труда и средств.

Менее трудоемким мероприятием по подкормке лосей является оставление и использование на корм порубочных остатков (сучьев и вершин) при рубках дубовых, осиновых и сосновых насаждений.

Большими запасами высокопитательных кормов обладают порубочные остатки при заготовке леса (вершины и сучья осины, дуба, сосны, ивы и даже березы). При рубке насаждений с примесью не менее 30% осины и других кормовых пород на 1 га сплошной лесосеки образуется до 3 тонн доступных животным кормов. Для обеспечения 25% суточной потребности в корме 5 голов за зимний сезон достаточно оставление порубочных остатков на 1,5–2,0 га сплошных и на 4–6 га выборочных рубок из расчета на 1000 га лесных угодий.

Во всех хозяйствах проектируется устройство солонцов из расчета 1 солонец на 1000 га. Расход соли на солонец составляет 30 кг в год. Старые солонцы ежегодно подновляются.

По мнению авторов, в современных условиях (о которых сказано выше) такие мероприятия могли бы проводиться по договору между охотпользователем и лесозаготовительным предприятием. В договоре в обязательном порядке должны быть закреплены следующие условия:

- условия и сроки проведения рубки;
- условия сохранения порубочных остатков;
- условия и сроки последующей очистки лесосек.

Кроме того, необходимо напомнить, что существуют «Нормативы основных биотехнических мероприятий» (утв. Заместителем Начальника Главного управления охотничьего хозяйства и заповедников при Совете Министров РСФСР В.И. Фертиковым, Москва, 1986). Эти нормативы, разработанные Центральной научно-исследовательской лабораторией охотничьего хозяйства и заповедников Главного управления охотничьего хозяйства и заповедников при Совете Министров РСФСР (В.В. Петрашов, М.Д. Перовский, И.А. Львов) и проверенные лесохозяйственной и охотхозяйственной практикой, кроме прочего, содержат следующие рекомендации:

Подрубку осин для оленей и косуль рекомендуется проводить в порядке рубок ухода в позднеосенний и зимний периоды. Осины рубят на высоте 1–1,5 м от земли так, чтобы комель оставался связанным с пнем (чтобы дерево не заносилось снегом). Наиболее целесообразно рубить осины диаметром 18–24 см. Большое значение имеет использование для подкормки оленей и косуль порубочных остатков. Они составляют 10–15% от объема заготовок древесины, и не менее 30% из этих остатков имеют кормовую ценность. Очистку вырубков, запланированных для подкормки копытных, необходимо проводить в предвесенний период самому охотничьему хозяйству по договоренности с лесохозяйственными организациями. Копытные используют такие остатки лучше всего в конце зимы – начале весны. Выкладывать их лучше всего под пологом леса рядом с вырубкой.

Наиболее целесообразные сроки подрубki осины и ивы для лосей – с конца октября – начала ноября по март включительно. Лучше всего подкалывать осину в возрасте 35–45 лет. Одно дерево в этом случае может дать до 20–40 кг корма, пригодного для лосей.

В практике охотничьего хозяйства подкалка ивы и осины для лосей осуществляется у солонцов. Авторы считают, что в случае использования порубочных остатков на лесосеках в биотехнических целях солонцы необходимо будет устраивать на таких лесосеках (рис. 2).

При определении технологических особенностей применения способов очистки лесосек, позволяющих использовать порубочные остатки в биотехнических целях, а также других работ, проводимых в биотехнических целях, применительно к условиям лесозаготовительных предприятий Северо-Запада Российской Федерации авторы считают необходимым принимать во внимание рекомендации, проверенные лесохозяйственной и охотхозяйственной практикой:



Рис. 2. Лоси у солонца на краю лесосеки
Fig. 2. The moose at the salt on the edge of the cutting area

«При омолаживании насаждений путем «посадки их на пень» с целью увеличения запаса кормов следует учесть, что процент пней с порослью не зависит от времени рубки, поэтому можно проводить ее поздней осенью и в начале зимы, чтобы крона срубленных деревьев и кустарников могла быть использована копытными. Наиболее эффективным способом рубки является спиливание. При рубке топором пни часто расщепляются, отчего поросль в верхней их части на второй год усыхает. Подлесок из ивы после посадки «на пень» может продуцировать в течение 10 лет» (Нормативы основных биотехнических мероприятий, Москва, 1986).

Обсуждение. Так ли важны биотехнические цели рубок лесных насаждений вообще и использование порубочных остатков в биотехнических целях в частности?

Авторы считают необходимым ещё раз отметить, что д.б.н., проф. Данилкин А.А. [2006] утверждает: «...потенциальный запас кормов для копытных на лесосеках, у нас обычно сразу же сжигаемый, огромен. Лишь одна срубленная осина диаметром 20-55 см даёт от 45 до 400 кг веточного корма. Следовательно, сохранение порубочных остатков до весны и под-

рубка осин должны быть одним из основных элементов биотехнических работ. Нелишним будет омолаживание кустарниковых и древесных зарослей, а также удобрение отдельных участков леса фосфатами и калийными солями, что приводит к увеличению кормовой ёмкости угодий в 2-5 раз. В принципе, любые лесные рубки, посадки, рекультивации или реконструкции малценных насаждений должны преследовать и биотехнические цели».

На основании наблюдений авторы считают возможным сделать вывод, что использование порубочных остатков в биотехнических целях позволяет снизить степень повреждения сосновых молодняков лесами.

Кроме того, при проведении лесозаготовок необходимо проектировать и проводить мероприятия по охране объектов животного мира и среды их обитания. В связи с этим авторы высказывают предложение, чтобы мероприятия, относящиеся к биотехническим мероприятиям или преследующие биотехнические цели, приравнялись к мероприятиям по охране объектов животного мира и среды их обитания. Например, использование порубочных остатков в биотехнических целях, безусловно, должно быть отнесено к мероприятиям по охране объектов животного мира и среды их обитания.

Также авторы предлагают некоторое количество деревьев осины, которая в настоящее время не пользуется спросом на рынке, оставлять на лесосеке именно в биотехнических целях. Эти деревья осины могут быть постепенно задействованы в качестве подкормки диким копытным животным и зайцам, а также для устройства солонцов. Это мероприятие также должно быть отнесено к мероприятиям по охране объектов животного мира и среды их обитания. Кроме биологического и лесоводственного эффекта, такое мероприятие будет иметь и экономический эффект.

Заключение. Биотехнические цели рубок лесных насаждений вообще и использование порубочных остатков в биотехнических целях в частности – актуальные, требующие дальнейших научных исследований вопросы.

Противоречия, содержащиеся в действующих нормативных документах в области лесного хозяйства и лесной промышленности, а также охотничьего хозяйства служат подтверждением этому.

Например, Перечень случаев использования лесов для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства без предоставления лесных участков (утверждённый Приказом Минприроды России № 661 от 12.12.2017) включает, в том числе, такой случай:

8. Организация осуществления биотехнических мероприятий, предусмотренных Федеральным законом от 24.07.2009 № 209-ФЗ «Об охоте и о сохранении охотничьих ресурсов и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации».

В свою очередь, Правила использования лесов для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства (утверждены Приказом Минприроды России № 661 от 12.12.2017) определяют, что использование лесов для осуществления видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства без предоставления лесных участков допускается, если осуществление указанных видов деятельности не влечет за собой проведение рубок лесных насаждений или создание объектов охотничьей инфраструктуры.

Таким образом, проводить (осуществлять) биотехнические мероприятия без предоставления лесных участков охотпользователю можно, но рубить при этом ничего нельзя. По сути дела, охотпользователь лишается возможности производить подвалку ивы и осины, устраивать солонцы.

Это обстоятельство объясняет важность не только использования порубочных остатков в биотехнических целях, но и обосновывает необходимость и значимость биотехнических целей рубок лесных насаждений в целом.

С другой стороны, лесозаготовителям необходимо проектировать и проводить мероприятия по охране объектов животного мира и среды их обитания. В связи с этим необходимо, чтобы мероприятия, относящиеся к биотехническим или преследующие биотехнические цели, приравнялись к мероприятиям по охране объектов животного мира и среды их обитания.

Таким образом, все виды работ, которые арендатор-лесозаготовитель проведёт в интересах охотничьего хозяйства, все мероприятия, имеющие биотехнические цели, должны быть отнесены к мероприятиям по охране объектов животного мира и среды их обитания, а также интегрированы в систему технологий лесозаготовительного производства.

«Специфичность животного мира в зависимости от определенных форм леса и сильная зависимость ряда протекающих в них явлений от животных — один из признаков, характеризующих лес как биогеоценоз» [Сукачев, 1964].

В связи с этим использование порубочных остатков в биотехнических целях должно быть также отнесено к мероприятиям по охране объектов животного мира и среды их обитания.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

- Данилкин А.А. Олени. М.: ГЕОС, 1999. 552 с.
Данилкин А.А. Дикие копытные в охотничьем хозяйстве. М.: ГЕОС, 2006. 366 с.

Данилов Д.Н., Русанов Я.С., Рыковский А.С., Солдаткин Е.И., Юргенсон П.Б. Основы охотопромыслов. М.: Лес. пром-ть, 1966. 332 с.

Данилов П.И. Охотничьи звери Карелии: экология, ресурсы, управление, охрана. Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. 388 с.

Кузнецов Б.А. Биотехнические мероприятия в охотничьем хозяйстве. М.: Экономика, 1967. 239 с.

Мелехов И.С. Лесоведение. М.: Лесн. пром-ть, 1980. 408 с.

Никонов М.В. Лесоводство: учеб. пособ. СПб.: Лань, 2022. 224 с.

Сеннов С.Н. Лесоведение и лесоводство: учебник. 3-е изд., перераб. и доп. СПб.: Лань, 2022. 336 с.

Сукачев В.Н. Основы лесной биогеоценологии. М.: Наука, 1964. 570 с.

Терминологический словарь по специальности «Лесопромысловое и лесопромысловое инвентаризация». М., 1993. 80 с.

References

Danilkin A.A. Olenyi. M.: GEOS, 1999. 552 p. (In Russ.)

Danilkin A.A. Wild ungulates in the hunting economy. M.: GEOS, 2006. 366 p. (In Russ.)

Danilov D.N., Rusanov Ya.S., Rykovsky A.S., Soldatkin E.I., Yurgenson P.B. Fundamentals of game management project. M.: Les. prom-t', 1966. 332 p. (In Russ.)

Danilov P.I. Game animals of Karelia: ecology, resources, management, protection. Petrozavodsk: Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences, 2017. 388 p. (In Russ.)

Kuznetsov B.A. Biotechnical measures in the hunting economy. M.: Economica, 1967. 239 p. (In Russ.)

Melekhov I.S. Forestry. M.: Lesn. prom-t', 1980. 408 p. (In Russ.)

Nikonov M.V. Forestry: a study guide. St. Petersburg: Lan' Publishing House, 2022. 224 p. (In Russ.)

Sennov S.N. Forest science and forestry: textbook. 3rd ed., reprint. and additional. St. Petersburg: Lan' Publishing House, 2022. 336 p. (In Russ.)

Sukachev V.N. Fundamentals of forest biogeocenology. M.: Nauka, 1964. 570 p. (In Russ.)

Terminological dictionary on the specialty «Forest management and forest inventory». M., 1993. 80 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 17.05.2024.

Шадрин Р.А., Угрюмов С.А., Козлова И.К. Использование порубочных остатков в биотехнических целях в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации. // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 271–288. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.271-288

Работа посвящена изучению одной из проблем взаимодействия лесного хозяйства, лесной промышленности и охотничьего хозяйства, характеризующейся в современных условиях особой актуальностью. Взаимосвязь между этими отраслями экономики и необходимость координации хозяйственной деятельности определяются, в том числе, тем, что использование лесов (в первую очередь, для заготовки древесины) и ведение охотничьего хозяйства (осуществление видов деятельности в сфере охотничьего хозяйства) производятся на одной и той же территории лесного фонда. При этом в результате лесосечных работ при проведении рубок спелых и перестойных лесных насаждений, рубок ухода за лесом, лесокультурных и других работ условия обитания лесных зверей и птиц могут существенно изменяться, что, в свою очередь, обусловит изменения в видовом составе, динамике численности и стационном распределении лесной фауны. Это обстоятельство придётся учитывать уже при ведении охотничьего хозяйства. Целью настоящего исследования является обоснование необходимости использования порубочных остатков в биотехнических целях как элемента технологии лесозаготовительных производств в контексте влияния на экологию леса и лесовосстановление, а также в анализе практики использования порубочных остатков в биотехнических целях в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации. На основании наблюдений авторы считают возможным сделать вывод, что использование порубочных остатков в биотехнических целях позволяет снизить степень повреждения сосновых молодняков лосями. Кроме того, при проведении лесозаготовок необходимо проектировать и проводить мероприятия по охране объектов животного мира и среды их обитания. В связи с этим авторы высказывают предложение, чтобы мероприятия, относящиеся к биотехническим или преследующие биотехнические цели, приравнивались к мероприятиям по охране объектов животного мира и среды их обитания. Например, использование порубочных остатков в биотехнических целях, безусловно, должно быть отнесено к мероприятиям по охране объектов животного мира и среды их обитания.

Ключевые слова: лесосечные работы, очистка лесосек, технология лесозаготовительных производств, биотехнические способы очистки мест рубок, использование порубочных остатков.

Shadrin R.A., Ugryumov S.A., Kozlova I.K. The use of felling residues for biotechnical purposes in the conditions of forestry in the North-West of the Russian Federation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehnikeskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 271–288 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.271-288

The article is devoted to the study of one of the problems of interaction between forestry, forestry industry and hunting, which is characterized by special relevance in modern conditions. The relationship between these sectors of the economy and the need to coordinate economic activities are determined, among other things, by the fact that

the use of forests (primarily for timber harvesting) and hunting (carrying out activities in the field of hunting) is carried out on the same territory of the forest fund. At the same time, as a result of logging operations during logging of ripe and overgrown forest plantations, logging of forest care, forestry and other works, the habitat conditions of forest animals and birds can change significantly, which in turn will cause changes in species composition, population dynamics and station distribution of forest fauna. This circumstance will have to be taken into account already when conducting a hunting farm. The purpose of this study is to substantiate the need to use felling residues for biotechnical purposes as an element of logging technology in the context of the impact on forest ecology and reforestation, as well as to analyze the practice of using felling residues for biotechnical purposes in the conditions of forestry in the North-West of the Russian Federation. Based on the observations, the authors consider it possible to conclude that the use of felling residues for biotechnical purposes reduces the degree of damage to pine young moose. In addition, when carrying out logging, it is necessary to design and carry out measures to protect wildlife and their habitat. In this regard, the authors propose that activities related to biotechnical activities or pursuing biotechnical goals should be equated with activities for the protection of wildlife and their habitat. For example, the use of felling residues for biotechnical purposes, of course, should be attributed to measures to protect wildlife and their habitat.

Key words: logging operations, clearing of cutting areas, technology of logging industries, biotechnical methods of clearing logging sites, use of felling residues.

ШАДРИН Роман Александрович – старший преподаватель кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 1768-1512.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: shadrin-ra1976@yandex.ru

SHADRIN Roman A. – Senior Lecturer of the Technologies of Logging Industries Department, St.Petersburg State Forestry University. SPIN-code: 1768-1512.

194021. Institute per 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: shadrin-ra1976@yandex.ru

УГРЮМОВ Сергей Алексеевич – профессор кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова, доктор технических наук. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-807-3542.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ugr-s@yandex.ru

UGRYUMOV Sergey A. – DSc (Technical), Professor of the Technologies of Logging Industries Department, St.Petersburg State Forestry University. ResearcherID: F-6510-2016. ORCID: 0000-0002-807-3542.

194021, Institute per 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: ugr-s@yandex.ru

КОЗЛОВА Ирина Константиновна – ассистент кафедры технологии лесозаготовительных производств Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета им. С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tlzp@spbftu.ru

KOZLOVA Irina K. – Assistant of the Technologies of Logging Industries Department, St.Petersburg State Forestry University.

194021, Institute per 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: tlzp@spbftu.ru

А.С. Васильев

МОДЕРНИЗИРОВАННАЯ ХАРВЕСТЕРНАЯ ГОЛОВКА

Введение. Парк лесозаготовительной техники отличается своим разнообразием. Развитие технологий и желание превзойти конкурентов требуют поиска новых технических решений по совершенствованию существующих конструкций лесозаготовительной техники и навесного оборудования к ней. Развитие техники связано в первую очередь с необходимостью ориентации на все возрастающие запросы потребителей, которые хотят видеть новые образцы техники с улучшенными ее характеристиками, более удобные в работе, обеспечивающие более высокую производительность и минимальные потери предмета труда.

С учетом современной ситуации, связанной с уходом из российского сегмента рынка ведущих мировых производителей лесной техники и необходимостью развития отечественного машиностроения, возникает потребность в поиске технических решений по созданию аналогов-заменителей. В данной ситуации представляется актуальным не просто искать пути повторения известных конструкций, а разрабатывать более современные конкурентоспособные образцы, наделенные новыми функциональными возможностями.

В известной работе [Lindroos et al., 2017] авторы отмечают, что основной движущей силой прогресса в развитии лесозаготовительной техники и технологий является необходимость в постоянной адаптации к местным потребностям. Такая адаптация заключается в приспособлении новых образцов к все возрастающим потребностям отрасли в увеличении объемов заготовки, расширении видов выпускаемой продукции, соответствии изменяющимся требованиям нормативных документов, условиям работы.

Одним из важных видов навесного оборудования для лесозаготовительной техники является харвестерная головка. Совершенствование данного агрегата требует изучения известных из уровня развития техники ее конструкций, их классификации, условий применения, отзывов и пожеланий потребителей, условий работы и особенностей предмета труда.

В работе [Будник, Демчук, 2012] представлена структурная модель харвестерной головки и обозначены пути ее совершенствования. Среди таких путей следует выделить повышение производительности на выпиливании сортиментов, придание харвестерной головке дополнительных функ-

ций, таких как: осуществление окорки, выработка пиломатериалов, измельчение древесины, определение качества древесины.

В работе [Базаров и др., 2021] отмечается, что за один цикл работы лесосечной машины, оснащенной харвестерной головкой, выполняются такие технологические операции как: валка, очистка дерева от сучьев, раскряжевка, сортировка. Приводятся результаты хронометража времени, затрачиваемого на выполнение каждой технологической операции харвестерной головкой, согласно которым самой производительной является операция валки: если ее принять за 100%, то производительность харвестерной головки на операции «очистка дерева от сучьев» на 16% ниже, на операции «раскряжевка» на 18% ниже, а наименьшей производительностью характеризуется операция «штабелевка» – минус 19% по отношению к производительности на операции валки, принятой за 100%.

Характерной особенностью эксплуатации лесной техники является ее работа в тяжелых природно-климатических условиях, что предъявляет ряд специфических требований не только к базовому агрегату, но и к его навесным исполнительным органам. Например, заготовка леса на Крайнем Севере и в регионах, приравненных к Крайнему Северу, а также на территории Арктической зоны сопряжена с такими трудностями, как низкие температуры окружающей среды и наличие глубокого снежного покрова.

Известно, что при сильных морозах гидравлические шланги, металлические элементы становятся более хрупкими и существенно возрастает вероятность их выхода из строя, поэтому многие операторы харвестеров останавливают работу при температурах ниже минус 30 °С [Глотвин, 2017].

При работе лесных машин в условиях отрицательных температур наблюдается обмерзание их навесного оборудования, которое зачастую становится причиной возникновения аварийного режима эксплуатации [Зырянов и др., 2021a; Зырянов и др., 2021б]. Для борьбы с этим явлением предложена система против обмерзания и образования наледи на харвестерной головке, описана конструкция обогрева харвестерной головки, которая в процессе работы совершает сложные криволинейные движения, путем подачи к ее узлам теплых выхлопных газов от двигателя внутреннего сгорания базовой машины. Авторами дается обоснование выбранных конструктивных характеристик системы обогрева.

Другая проблема ведения лесозаготовок в зимний период связана с наличием снежного покрова. При большой толщине снежного покрова, чтобы уменьшить высоту оставляемого пня, необходимо осуществлять расчистку снега вокруг стволов деревьев для получения доступа валочного оборудования к прикорневой их части.

Согласно нормативному документу ГОСТ 12.3.015 «Система стандартов безопасности труда. Работы лесозаготовительные» при валке дерева моторным инструментом предварительно должен быть расчищен снег вокруг ствола дерева и отходные дорожки длиной не менее 4 м под углом 45° в направлении, противоположном падению дерева. В работе [Мохирев, 2020] указано, что при высоте снежного покрова более 0,6 м согласно нормам в помощь вальщику для выполнения указанной операции выделяется помощник. На этой операции используется специализированный инструмент, чаще всего совковая лопата, но могут использоваться и специальные приспособления, например, описанные в патентах SU 436735, RU 37732.

Наличие глубокого снежного покрова ведет к дополнительным затратам и увеличению себестоимости круглых лесоматериалов. При величине снежного покрова более 60 см наблюдается существенное снижение производительности лесозаготовительных работ. При увеличении толщины до 1 м производительность снижается практически в два раза, а при толщине 130 см снижение происходит практически в четыре раза. Снижение производительности обусловлено несколькими факторами, основными из которых являются затруднение движения техники и доступности заготавливаемых деревьев, увеличение времени на подготовку места валки. [Мохирев, 2020] приходит к выводу, что: «Для обеспечения культуры производства, снижения уровня ручного труда и во избежание производственного травматизма необходимо наиболее широкое применение на лесозаготовках высокотехнологичных многооперационных машин, адаптированных к суровым климатическим условиям севера».

Альберт Пестов, начальник производственного департамента группы компаний «Титан», констатирует, что при наличии снежного покрова приходится заглублять харвестерную головку, что чревато ее механическими повреждениями [Пестов, 2017]. Раймо Хакулинен, менеджер по работе с подрядчиками ООО «Мется Форест Подпорожье» отмечает, что в весенний период (в марте), когда еще много снега, головка харвестера не способна пробить уже крепкий наст, в связи с чем остаются высокие пни, приводящие к потерям [Хакулинен, 2017].

Материалы и методика исследования. Цель работы – поиск путей совершенствования конструкции харвестерной головки для заготовки леса в зимний период.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- установить технический уровень развития харвестерных головок на основе анализа отечественных разработок;

- изучить особенности ведения лесозаготовительного процесса при наличии глубокого снежного покрова;
- провести анализ существующих конструкций харвестерных головок и синтез новых технических решений по их модернизации для повышения эффективности работы в условиях наличия глубокого снежного покрова.

Для достижения цели и решения поставленных задач использовались методы:

- информационного поиска. При информационном поиске изучались патенты на изобретения, полезные модели, промышленные образцы; также изучалась научная литература, техническая литература, материалы конференций и выставок. Информационный поиск осуществлялся по всем доступным источникам информации, в частности по наукометрическим базам данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ), Russian Science Citation Index (RSCI), сети Internet, патентным базам данных Федерального института промышленной собственности (ФИПС);
- функционально-структурно-технологического анализа. Метод функционально-структурно-технологического анализа предполагал рассмотрение объекта исследования с различных точек зрения: с точки зрения особенностей и возможностей его функционирования в различных природно-производственных условиях; с точки зрения конструктивного устройства рассматриваемого объекта – его конструктивных элементов и взаимосвязей между ними; с точки зрения технологической – места, отводимого рассматриваемому объекту в технологическом процессе, и возможностей как последовательного выполнения технологических операций, так и их совмещения;
- метод синтеза. Метод синтеза применялся при выработке новых технических решений на основании данных, полученных по итогам патентно-информационного поиска, функционально-структурно-технологического анализа и позволил предложить модернизированную конструкцию харвестерной головки для эффективной работы в условиях наличия глубокого снежного покрова.

Результаты исследования. Функциональные возможности харвестерных головок по выполнению определенных операций определяются возможностями программного обеспечения управляющего блока бортового компьютера и используемыми датчиками:

- измерение геометрических параметров лесоматериалов;
- определение объема лесоматериалов;
- выбор оптимальной схемы раскроя с учетом дефектов древесины;
- разметка лесоматериалов;
- возможность работы с искривленной древесиной (изогнутыми деревьями).

В ходе структурного анализа были выявлены следующие основные структурные части харвестерной головки:

- рама;
- корпус;
- механизм поворота корпуса относительно рамы;
- механизм поворота рамы относительно стрелы манипулятора;
- механизм захвата и удержания ствола (количество, форма, расположение захватных рычагов);
- подающий (протаскивающий) механизм (вальцовый, гусеничный, импульсный);
- механизм отмера длин сортиментов (рычажный, зубчатое колесо);
- механизм обрезки сучьев (расположение, количество, форма сучкорезных ножей);
- срезающий механизм (консольная цепная пила, дисковая пила, механизм ножового, гильотинного типа).

По результатам анализа патентного фонда была установлена возможность использования в конструкции харвестерной головки таких дополнительных механизмов, как: дополнительный сучкорезный нож с пневматическим приводом, совершающий в дополнение к режущему еще и ударное воздействие на предмет труда [Рукомойников, Купцова, 2021], окорочный модуль (патенты RU 2676139, RU 181751, RU 2701363, RU 2741128, [Рукомойников и др., 2022]), модуль кольцевания стоящих на корню деревьев (патенты RU 202101, RU 202144), возможность захвата и накопления нескольких стволов при работе в молодняках [Харвестерные головки..., 2014], модуль ультразвуковой дефектоскопии обрабатываемых стволов [Емельянов, 2012], модуль для измельчения пней (патент RU 121467), модуль подогрева конструктивных элементов выхлопными газами ДВС базового трактора [Зырянов и др., 20216].

По результатам анализа условий ведения лесозаготовительных работ в зимний период установлено, что одной из важных проблем является наличие глубокого снежного покрова. При ручной заготовке леса данная проблема решается тем, что вальщику приходится выполнять окапывание стоящих на корню деревьев с использованием ручных инструментов, что является трудоемкой операцией. При машинной валке использование ручного труда на данной операции недопустимо как по технике безопасности, так и с точки зрения производительности работ.

Функционально-структурно-технологический анализ харвестерной головки позволил найти несколько технических решений для придания ново-

го функционала харвестерной головке – возможности окапывания стоящих на корню деревьев.

Одно из таких решений, защищенное патентом RU 206516, заключается в оснащении харвестерной головки выдвижным отвалом. Данный рабочий орган относится к рабочим органам пассивного типа.

Другое техническое решение заключается в оснащении харвестерной головки рабочим органом уже активного типа. Как известно, рабочие органы активного типа более производительны.

Согласно новому решению предлагается модернизировать конструкцию харвестерной головки путем установки на тыльной стороне ее корпуса 1 шнека 2. Шнек устанавливается на длинном плече разноплечего поворотного рычага 3 таким образом, чтобы при нахождении в одном крайнем (транспортном) положении он не выступал за габариты корпуса 2 с учетом рамы 4 харвестерной головки (рис. 1), а при другом крайнем (рабочем) положении он располагался за пределами габаритов харвестерной головки ниже пильного механизма 5 (рис. 2). Поворот шнека 2 осуществляется гидроцилиндром 6, шток которого соединен с коротким плечом разноплечего рычага 3. Соотношение короткого и длинного плеч рычага 3 выбрано таким образом, чтобы хода штока гидроцилиндра хватало для перевода шнека из транспортного положения в рабочее и обратно путем поворота рычага вокруг оси 7 его крепления.

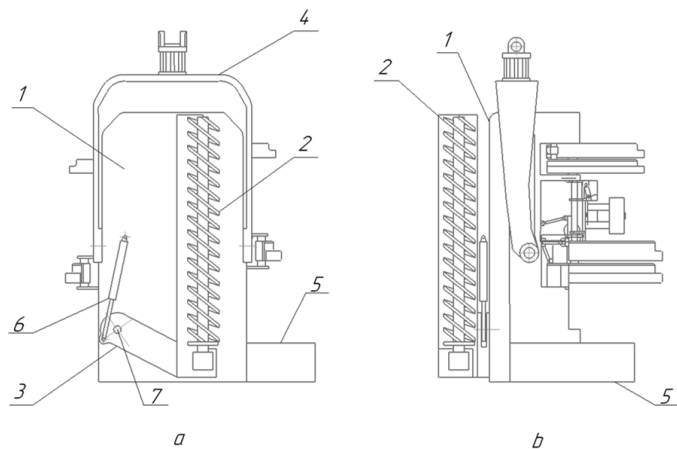


Рис. 1. Модернизированная харвестерная головка в транспортном положении: а – вид сзади; б – вид сбоку

Fig. 1. Modernised harvester head in transport position:
а – rear view; б – side view

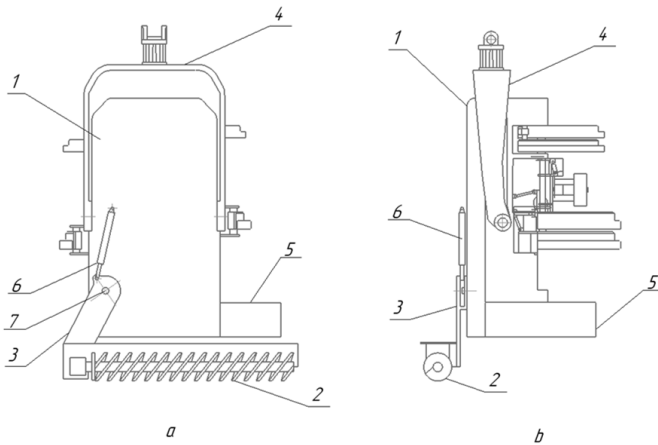


Рис. 2. Модернизированная харвестерная головка в рабочем положении:
а – вид сзади; б – вид сбоку

Fig. 2. Modernised harvester head in working position:
a – rear view; b – side view

Работает модернизированная харвестерная головка следующим образом. При наличии снежного покрова вблизи ствола дерева оператор приводит шнек из транспортного положения в рабочее путем его поворота вокруг шарнира крепления 7. Такое движение обеспечивается за счет установки шнека на длинном плече разноплечего поворотного рычага, короткое плечо которого соединено с гидроцилиндром. Затем оператор включает механизм вращения шнека и расчищает пространство вблизи ствола дерева от снежного покрова. Далее шнек приводится в транспортное положение, и осуществляются захват дерева в прикорневой части харвестерной головкой и его последующая валка, раскряжевка.

Технический результат модернизированной конструкции харвестерной головки заключается в снижении динамической нагрузки на конструктивные элементы харвестера (манипулятор, раму харвестерной головки и т. д.) при расчистке пространства вокруг ствола стоящего дерева по сравнению с ближайшим аналогом – харвестерной головкой, оснащенной пассивным рабочим органом в виде отвала. Также модернизированная конструкция харвестерной головки позволит обеспечить повышение производительности работ и снижение утомляемости оператора за счет уменьшения количества движений управления по сравнению с аналогом.

Шнек может быть выполнен как с односторонним направлением витков по всей длине, так и разносторонним, обеспечивающим перемещение снега от центральной его части к периферии. Использование шнека с разносторонним направлением витков позволит обеспечить более благоприятный режим работы манипулятора, на который установлена харвестерная головка модернизированной конструкции, по причине уравнивания боковых сдвиговых нагрузок при смещении снега одновременно в противоположных направлениях.

В отношении модернизированной конструкции харвестерной головки подано две заявки в Федеральный институт промышленной собственности: одна на полезную модель № 2023130507 «Харвестерная головка для зимней заготовки леса», которая находится на стадии экспертизы по существу, и заявка на изобретение № 2023130498 «Способ валки деревьев при зимней заготовке леса», в отношении которой принято положительное решение о выдаче патента.

Заключение. В ходе работы проанализирован отечественный патентный фонд и научные публикации, посвященные вопросам модернизации харвестерных головок. Установлено, что основная масса заявок на патентование связана с приданием новых функций харвестерной головке, что говорит о достаточно высоком уровне развития ее «классической» конструкции и востребованности поиска не эволюционных, а скачкообразных технических решений по расширению ее технологических возможностей.

Установлено, что ведущая роль в поиске путей совершенствования харвестерных головок в нашей стране принадлежит университетам. Машиностроительные предприятия и иностранные фирмы патентуют технические решения в отношении конструктивных элементов и системы управления рабочими органами харвестерной головки, а университеты ведут научно-поисковые исследования по модернизации конструкций харвестерных головок путем придания им новых функциональных возможностей. С точки зрения использования харвестерных головок при наличии глубокого снежного покрова целесообразным видится оснащение их возможностью выполнения функции окапывания стоящих на корню деревьев.

В ходе проведенной работы была предложена конструкция харвестерной головки, оснащенной активным рабочим органом, способным осуществлять расчистку пространства вокруг ствола стоящего на корню дерева от снежного покрова.

Результаты работы могут быть полезны организациям, ведущим научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по совершенствованию лесной техники.

Описанная конструкция модернизированной харвестерной головки может представлять интерес для организаций, занимающихся выпуском навесного оборудования для лесных машин.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Базаров С.М., Беленький Ю.И., Свойкин Ф.В., Свойкин В.Ф., Бальде Т.М.Д. Системный анализ динамики работы харвестерной головки валочно-сучкорезно-раскряжевой машины (ХГ ВСРМ) // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2021. Вып. 235. С. 150-164.

Будник П.В., Демчук А.В. Функционально-технологический анализ харвестерной головки // Наука и бизнес: пути развития. 2012. № 9(15). С. 36–38.

Глотвин Д. Слово лесозаготовителям Алтайского края // Лесозаготовка. Специализированный журнал для лесозаготовителей и не только. 2017. URL: <https://lesozagotovka.com/rybriki/tekhnologii-lesozagotovok/tsennyi-opyt-zimney-raboty/> (дата обращения: 21.01.2024).

Емельянов С.А. Модернизация харвестерной головки, интеграция ультразвукового датчика дефектоскопии древесины для оптимизации схемы раскряжки хлыстов // Труды лесоинженерного факультета ПетрГУ. 2012. Т. 9. № 1. С. 13–15.

Зырянов М.А., Мохирев А.П., Госман А.В. Модернизация конструкции лесозаготовительных машин // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021а. № 4. С. 21–24.

Зырянов М.А., Салтанов А.Г., Давыденко А.Н. Обогрев навесного оборудования лесозаготовительной техники на примере многофункциональной харвестерной головки // Наука и бизнес: пути развития. 2021б. № 4 (118). С. 37-46.

Мохирев А. В. снежном плену // Лесозаготовка. Специализированный журнал для лесозаготовителей и не только. 2020. URL: <https://lesozagotovka.com/rybriki/nauka-proizvodstvu/v-snezhnom-plenu/> (дата обращения: 21.01.2024).

Пестов А. Ценный опыт зимней работы // Лесозаготовка. Специализированный журнал для лесозаготовителей и не только. 2017. URL: <https://lesozagotovka.com/rybriki/tekhnologii-lesozagotovok/tsennyi-opyt-zimney-raboty/> (дата обращения: 21.01.2024).

Рукомойников К.П., Купцова В.О. Модернизация конструкции механизма для очистки деревьев от сучьев многооперационными лесными машинами // ИВУЗ. Лесной журнал. 2021 № 3 (381). С. 117–124.

Рукомойников К.П., Царев Е.М., Анисимов С.Е., Татаринов Д.С., Купцова В.О., Гилязова Т.А. Модернизация валочно-сучкорезно-раскряжевого механизма лесного харвестера // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. № 3 (387). С. 130–138.

Хакулинен Р. Ценный опыт зимней работы // Лесозаготовка. Специализированный журнал для лесозаготовителей и не только. 2017. URL: <https://lesozagotovka.com/rybriki/tekhnologii-lesozagotovok/tsennyi-opyt-zimney-raboty/> (дата обращения: 21.01.2024).

Харвестерные головки: опыт, создающий результат // PromoGroup Media. 2014. URL: <https://forestcomplex.ru/lesozagotovka/harvesternye-golovki-opyit-sozdayushhiy-rezultat/> (дата обращения: 21.01.2024).

Lindroos O., Hera L., Xavier P., Carola H. Drivers of advances in mechanized timber harvesting – a selective review of technological innovation // Croatian journal of forest engineering. 2017. Vol. 38. P. 243–258.

References

Bazarov S.M., Belen'kij Yu.I., Svojkin F.V., Svojkin V.F., Bal'de T.M.D. Sistemnyj analiz dinamiki raboty harvesternoj golovki valочно-suchkorezno-raskryazhevochnoj mashiny (HG VSRM). *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehneskoj Akademii*, 2021, iss. 235, pp. 150–164. (In Russ.)

Budnik P.V., Demchuk A.V. Funkcional'no-tekhnologicheskij analiz harvesternoj golovki. *Nauka i biznes: puti razvitiya*, 2012, no. 9(15), pp. 36–38. (In Russ.)

Emel'yanov S.A. Modernizatsiya harvesternoj golovki, integratsiya ul'trazvukovogo datchika defektoskopii drevesiny dlya optimizatsii skhemy raskroya hlystov. *Trudy lesoinzhenernogo fakul'teta Petr-GU*, 2012, vol. 9, no. 1, pp. 13–15. (In Russ.)

Glotvin D. Slovo lesozagotovitel'nykh Altajskogo kraja. *Lesozagotovka. Specializirovannyj zhurnal dlya lesozagotovitelej i ne tol'ko*. 2017. URL: <https://lesozagotovka.com/rybriki/tekhnologii-lesozagotovok/tsennyy-opyt-zimney-raboty/> (accessed January 21, 2024). (In Russ.)

Hakulinen R. Cennyj opyt zimnej raboty. *Specializirovannyj zhurnal dlya lesozagotovitelej i ne tol'ko*, 2017. URL: <https://lesozagotovka.com/rybriki/tekhnologii-lesozagotovok/tsennyy-opyt-zimney-raboty/> (accessed January 21, 2024). (In Russ.)

Harvesternye golovki: opyt, sozdayushchij rezul'tat. *PromoGroup Media*, 2014. URL: <https://forestcomplex.ru/lesozagotovka/harvesternye-golovki-opyit-sozdayushhiy-rezultat/> (accessed January 21, 2024). (In Russ.)

Lindroos O., Hera L., Xavier P., Carola H. Drivers of advances in mechanized timber harvesting – a selective review of technological innovation. *Croatian journal of forest engineering*, 2017, vol. 38, pp. 243–258.

Mohirev A. V snezhnom plenu. *Lesozagotovka. Specializirovannyj zhurnal dlya lesozagotovitelej i ne tol'ko*, 2020. URL: <https://lesozagotovka.com/rybriki/nauka-proizvodstvu/v-snezhnom-plenu/> (accessed January 21, 2024). (In Russ.)

Pestov A. Tsennyy opyt zimnej raboty. *Lesozagotovka. Specializirovannyj zhurnal dlya lesozagotovitelej i ne tol'ko*, 2017. URL: <https://lesozagotovka.com/rybriki/tekhnologii-lesozagotovok/tsennyy-opyt-zimney-raboty/> (accessed January 21, 2024). (In Russ.)

Rukomoynikov K.P., Kuptsova V.O. Modernizatsiya konstruksii mekhanizma dlya ochistki derev'ev ot such'ev mnogooperatsionnymi lesnymi mashinami. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2021, no. 3 (381), pp. 117–124. (In Russ.)

Rukomoynikov K.P., Tsarev E.M., Anisimov S.E., Tatarinov D.S., Kuptsova V.O., Gilyazova T.A. Modernizatsiya valочно-suchkorezno-raskryazhevochnogo mekhanizma lesnogo kharvestera. *IVUZ. Lesnoy zhurnal*, 2022, no. 3 (387), pp. 130–138. (In Russ.)

Zyryanov M.A., Mohirev A.P., Gosman A.V. Modernizatsiya konstrukcii lesozagotovitel'nyh mashin. *Remont. Vosstanovlenie. Modernizatsiya*, 2021a, no. 4, pp. 21–24. (In Russ.)

Zyryanov M.A., Saltanov A.G., Davydenko A.N. Obogrev navesnogo oborudovaniya lesozagotovitel'noj tekhniki na primere mnogofunktsional'noj harvesternoj golovki. *Nauka i biznes: puti razvitiya*, 2021b, no. 4 (118), pp. 37–46. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 18.02.2024

Васильев А.С. Модернизированная харвестерная головка // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 289–300. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.289-300

В статье рассмотрены вопросы модернизации харвестерной головки. Целью работы являлась разработка конструкции харвестерной головки для повышения производительности лесозаготовительных работ в условиях Крайнего Севера и Арктической зоны при наличии глубокого снежного покрова. В результате работы предложена конструкция харвестерной головки, оснащенной активным рабочим органом, способным расчищать пространство вокруг стволов стоящих на корню деревьев. Активный рабочий орган обеспечивает высокую производительность работ при небольшом количестве управляющих воздействий оператора. Предложенная конструкция позволит увеличить объем заготавливаемой древесины за счет уменьшения высоты оставляемых пней.

Ключевые слова: харвестерная головка, снежный покров, заготовка древесины, валка, Арктическая зона, Крайний Север.

Vasilev A.S. Modernized harvester head. *Izvestia Sankt-Peterburgskoy Lesotekhnicheskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 289–300 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.289-300

The article deals with the modernisation of the harvester head. The aim of the work was to develop the design of a harvester head to increase the productivity of logging operations in the Far North in the presence of deep snow cover. As a result of the work the design of a harvester head equipped with an active working body capable of clearing the space around the trunks of rooted trees was proposed. The active working body provides high productivity of work with a small number of control actions of the operator. The proposed design will increase the volume of harvested timber by reducing the height of stumps left behind.

Key words: harvester head, snow cover, timber harvesting, felling.

ВАСИЛЬЕВ Алексей Сергеевич – доцент кафедры технологии лесного комплекса и ландшафтной архитектуры Института лесных, горных и строительных наук Петрозаводского государственного университета, кандидат технических наук, доцент. ORCID: 0000-0003-2349-5600. SPIN-код: 9913-9998. Scopus AuthorID: 57192716396.

185910, пр. Ленина, д. 33, г. Петрозаводск, Россия. E-mail: alvas@psu.karelia.ru

VASILEV Aleksey S. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Forest Complex Technology and Landscape Architecture, Institute of Forest, Mining and Building Sciences of Petrozavodsk State University, Associate Professor. ORCID: 0000-0003-2349-5600. SPIN-code: 9913-9998. Scopus AuthorID: 57192716396.

185910, Lenin av. 33, Petrozavodsk, Russia. E-mail: alvas@psu.karelia.ru

**Л.Д. Бухтояров, С.В. Малюков, М.Н. Лысыч, М.В. Шавков,
А.Ф. Петков, М.А. Попов**

ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ ДЛЯ АНАЛИЗА КИНЕМАТИКИ ЛЕСОПОСАДОЧНОГО АППАРАТА ЦЕПНОГО ТИПА

Введение. Потребление древесины постоянно растет. Для удовлетворения этой потребности ежегодно в России вырубается леса на площади около 120 тыс. га. При современной технологии лесоразработок после сплошных рубок образуются большие площади, на части которых необходимо проводить искусственное лесовозобновление. Согласно прогнозу по отрасли объем лесовосстановительных работ с учетом развития лесозаготовок в ближайшие 10–15 лет будет увеличиваться.

В настоящее время при создании лесных культур почти повсеместно отдается предпочтение посадкам. Несмотря на то, что посев семян легче механизировать, преимущества создания лесных культур посадкой вызвали необходимость разработки лесопосадочных машин. Для охвата механизированной посадкой леса всех имеющихся площадей необходимо создание новых лесопосадочных машин.

Одним из направлений совершенствования технологического процесса механизированной посадки является усовершенствование и разработка новых механизмов для подачи семян (саженцев) в посадочную щель, образуемую сошником.

Для обоснования параметров лесопосадочного аппарата необходимо определить параметры движения его звеньев. Наиболее актуальные методы решения подобных задач применительно к машинам сельскохозяйственного и лесного назначения описаны в работах [Жданов, 1969; Шабанов, 2002; Титов, 2006; Шавков, 2013; Бартенев, 2015; Клубничкин и др., 2020; Беляев и др., 2021].

Для анализа кинематики лесных машин используют автоматизированные программные продукты, такие как SolidWorks, Matlab/Simulink [Бартенев и др., 2020; Bukhtoyarov et al., 2021]. Однако использование зарубежного программного обеспечения не отвечает современным тенденциям, поэтому нами были использованы отечественный программный комплекс моделирования механических систем «Универсальный механизм 9.0» и среда 3D проектирования КОМПАС-3D.

Методика расчета. Выполним проектирование лесопосадочного аппарата в САПР КОМПАС-3D (рис. 1).

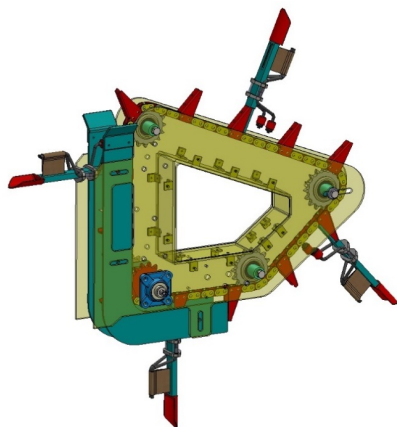


Рис. 1. 3D-модель лесопосадочного аппарата
Fig. 1. 3D-model of the working body forest planter

Втулки с лучами движутся по траектории, которая определяется цепью (рис. 2).

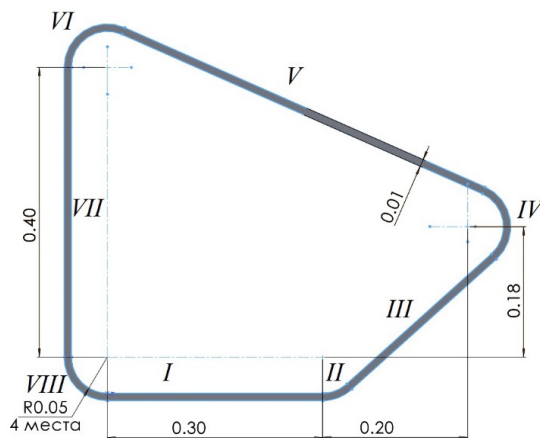


Рис. 2. Общий вид траектории движения цепи
Fig. 2. General view of the trajectory of the chain movement

Траекторию движения цепи разобьем на восемь участков. Геометрические параметры каждого участка представлены в табл. 1. Начало прямолинейных участков по осям абсцисс и ординат обозначим как X_0 , Y_0 , окончание – X_k , Y_k , где k – порядковый номер участка траектории движения цепи. Длину прямолинейных и криволинейных участков обозначим как S и соединим их

радиусом R , проведенным из X_0 , Y_0 соответствующих участков. Угол наклона прямолинейных участков обозначим как α . Начальный угол криволинейных участков обозначим как φ_0 , а величину угла криволинейного участка как $\Delta\varphi$.

Таблица 1

Геометрические параметры траектории цепи
Geometric parameters of the chain trajectory

Прямолинейные участки						
№	X_0 , м	Y_0 , м	X_k , м	Y_k , м	α , °	S , м
I	0	0	0,3	0	0	0,3
III	0,332	0,013	0,535	0,193	41,7	0,271
V	0,522	0,276	0,02	0,496	156,3	0,548
VII	-0,05	0,45	-0,05	0,05	270	0,4
Криволинейные участки						
	X_0 , м	Y_0 , м	R , м	φ_0 , °	$\Delta\varphi$, °	S , м
II	0,3	0,05	0,05	270	41,7	0,036
IV	0,502	0,230	0,05	318,3	114,63	0,1
VI	0	0,450	0,05	66,3	113,67	0,01
VIII	0	0,05	0,05	180	90	0,079

Время прохождения втулок по цепи зависит от расстояния S и заданной скорости подачи $V_p = 0,25$. Определим расчетное время движения втулок на основании системы (1):

$$\begin{cases} \text{I участок:} & 0 \leq t < S_1 / V_p, \\ \text{II... VIII участки:} & \sum_{i=0}^{n-1} S_i / V_p \leq t < \sum_{i=0}^n S_i / V_p, \quad n = 2 \dots 8. \end{cases} \quad (1)$$

Подставив значения скорости и перемещений, получим

$$\begin{cases} 0 \leq t < 1,2, \\ 1,2 \leq t < 1,35, \\ 1,35 \leq t < 2,43, \\ 2,43 \leq t < 2,83, \\ 2,83 \leq t < 5, \\ 5 \leq t < 5,42, \\ 5,42 \leq t < 7, \\ 7 \leq t < 7,33. \end{cases} \quad (2)$$

Составим уравнения движения втулок цепи на каждом из восьми участков. При составлении уравнений представим угловую скорость на криволинейных участках $\omega = V_p/R$, а время, затрачиваемое на прохождение участков $t = S/V_p$. При определении значений углов тригонометрических функций на новых участках, с учетом непрерывности времени моделирования, необходимо уменьшать угол на величину произведения угловой скорости на время, затраченное ранее на предыдущих участках.

Для линейных участков уравнения примут вид:

$$\begin{cases} x_n(t) = X_{0-n} + V_p \cdot \left(t - \sum_{i=0}^{n-1} S_i / V_p \right) \cdot \cos(\alpha_n), & \sum_{i=0}^{n-1} S_i / V_p \leq t < \sum_{i=0}^n S_i / V_p, \\ y_n(t) = Y_{0-n} + V_p \cdot \left(t - \sum_{i=0}^{n-1} S_i / V_p \right) \cdot \sin(\alpha_n), & \text{для } n = 1, 3, 5, 7; \end{cases} \quad (3)$$

Для криволинейных участков уравнения примут вид:

$$\begin{cases} x_n(t) = X_n + R_n \cdot \cos \left(\Phi_{0-n} + V_p / R_n \cdot \left(t - \sum_{i=0}^{n-1} S_i / V_p \right) \right), & \sum_{i=0}^{n-1} S_i / V_p \leq t < \sum_{i=0}^n S_i / V_p \\ y_n(t) = Y_n + R_n \cdot \sin \left(\Phi_{0-n} + V_p / R_n \cdot \left(t - \sum_{i=0}^{n-1} S_i / V_p \right) \right), & \text{для } n = 2, 4, 6, 8; \end{cases} \quad (4)$$

Импортируем из 3D-модели деталь «Луч» в программу имитационного моделирования «Универсальный механизм 9.0». Расположим «Луч» в начале системы координат и зададим возможность поступательного движения по осям OX, OZ и вращательного движения относительно оси OY (рис. 3). Внесем уравнения (3), (4) в имитационную модель для каждого из участков траектории, начиная с пятого.

Выделим звенья, которые имеют дискретное взаимодействие друг с другом. Ролики взаимодействуют с направляющими. Брикет взаимодействует с ложементом, механизмом подачи и грунтом. Ствол брикета взаимодействует с пластинами захвата и механизмом подачи. Для реализации данных взаимодействий в имитационной модели выполним следующие действия.

Представим ролики в виде конуса, верхний R_1 и нижний R_2 радиусы которого 0,01 м, высота $h = 0,02$ м. Брикет представим в виде конуса с $R_1 = 0,02$ м; $R_2 = 0,02$ м; $h = 0,06$ м. Ствол – в виде конуса с $R_1 = 0,003$ м; $R_2 = 0,003$ м; $h = 0,08$ м. Ложемент «Луча» и ответную часть представим в виде набора полиэдров, в которых вписан брикет с зазором 0,005 м. Зазор необходим для свободного движения брикета в начале моделирования, чтобы система пришла в равновесие, и не возникали резкие скачки сил от контактов тел. Контактное взаимодействие зададим по граням данных полиэдров.

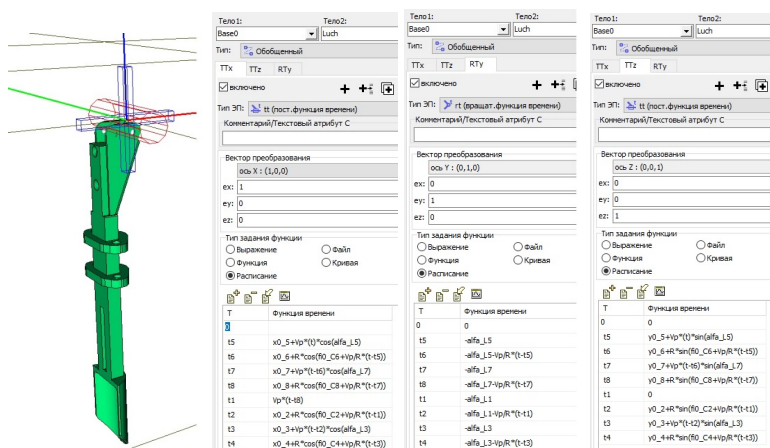


Рис. 3. Параметры обобщённого шарнира между локальной системой координат звена «Луч» и начальной системой координат всей модели
Fig. 3. Parameters of the generalized hinge between the local coordinate system of the «Beam» link and the initial coordinate system of the entire model

Результаты и обсуждения. На рис. 4, 5 показаны характерные положения звеньев рабочего органа лесопосадочной машины.

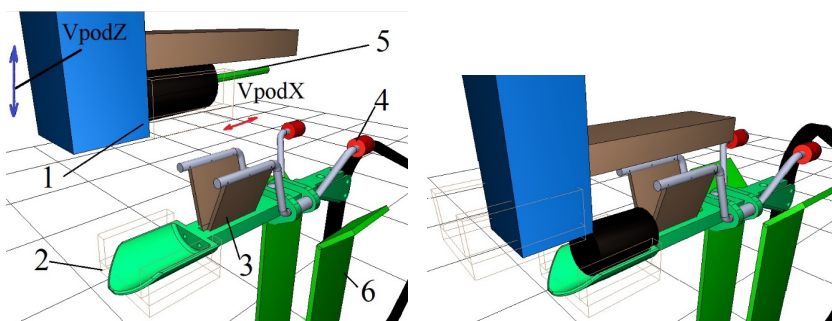


Рис. 4. Дискретное контактное взаимодействие твёрдых тел
Fig. 4. Discrete contact interaction of solids

Механизм подачи бrikета со стволом перемещается по оси Z со скоростью V_{podZ} , а его затвор сбрасывает бrikет в ложе, перемещаясь по оси X со скоростью V_{podX} . После падения бrikет захватывается в ложе 2, а ствол в зажимах 3. Ролики 4, входя в контакт с направляющими 6, зажимают пластины 3, которые удерживают ствол, пока ролики контактируют с направляющими и отпускают его в нижнюю точку посадки.

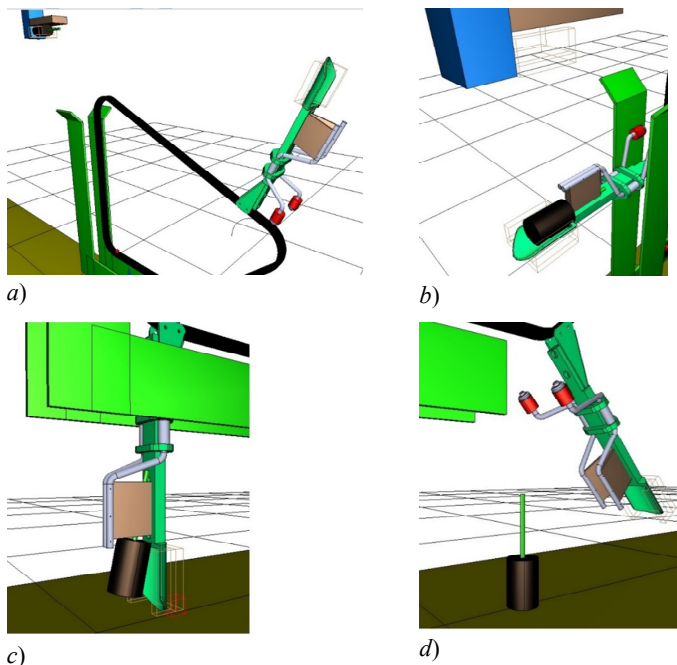


Рис. 5. Положение звеньев рабочего органа: а) холостой ход; б) зажим в вертикальной полосе; в) зажим в горизонтальной полосе; д) высадка

Fig. 5. The position of the links of the working body: a) idling; b) clamping in the vertical strip; c) clamping in the horizontal strip; d) disembarkation

Подачу саженца по оси OZ и OX зададим зависимостями, показанными на рис. 6.

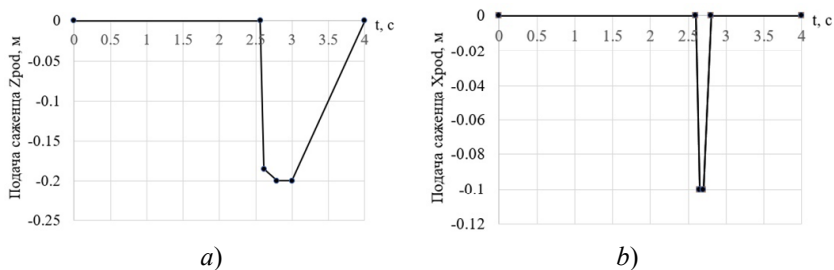


Рис. 6. Подача саженца: а) по оси OZ; б) по оси OX

Fig. 6. Seedling feeding: a) along the OZ axis; b) along the OX axis

Изменение положения абсциссы и ординаты брикета показано на рис. 7. Подача рамы рабочего органа составляет 0,25 м/с и направлена справа налево по оси ОХ. Закладка брикета механизмом подачи выполняется в соответствии с рис. 6.

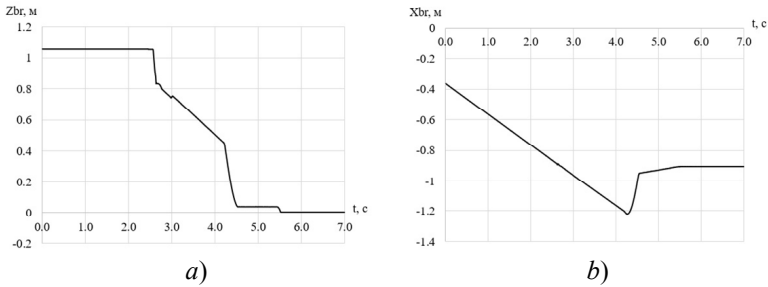


Рис. 7. Изменение положения брикета во времени: а) изменение вертикального положения; б) изменение горизонтального положения

Fig. 7. The change in the position of the briquette over time: a) a change in the vertical position; b) a change in the horizontal position

На основании полученных данных видно, что в начале движения брикет перемещается под действием подачи рабочего органа горизонтально вправо. Начиная с 2,5 с включается в работу механизм подачи брикета, за счет чего уменьшается его вертикальная составляющая, и продолжает изменяться горизонтальная составляющая, так как брикет контактирует со звеньями захвата. При достижении значения времени 5,5 с происходит установка брикета в почву, и его вертикальная и горизонтальные координаты далее не изменяются.

Траектория движения в плоскости посадки OZX показана на рис. 8а, а скорость движения брикета на рис. 8б.

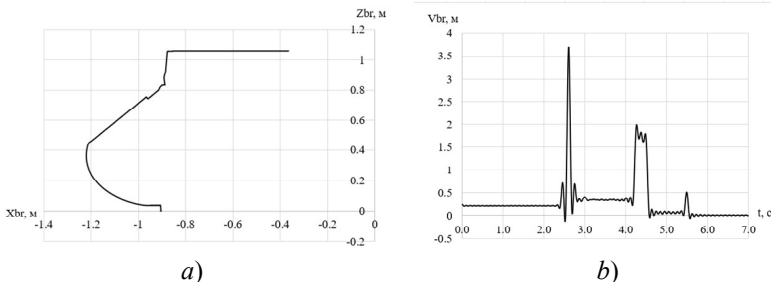


Рис. 8. Кинематические характеристики движения брикета: а) траектория движения в плоскости посадки; б) скорость брикета

Fig. 8. Kinematic characteristics of the movement of the briquette: a) the trajectory of movement in the landing plane; b) the speed of the briquette

В начальный момент времени скорость брикета соответствует скорости подачи рамы машины, в момент работы подающего механизма резко возрастает, в момент захвата снижается, а на угле разворота цепи на 90 градусов снова имеется пик, после чего происходит установка брикета в почву и скорость падает до нуля.

Ролики расположены на тягах, которые соединены пружинами с «Лучом». Жесткость пружин $c_{\text{prг}} = 5000$, коэффициент диссипации $d_{\text{prг}} = 10$, усилие предварительного натяжения $F_{\text{prг}} = 10$ Н. Сила на пружине и траектория движения роликов в проекции на плоскость XOY показаны на рис. 9.

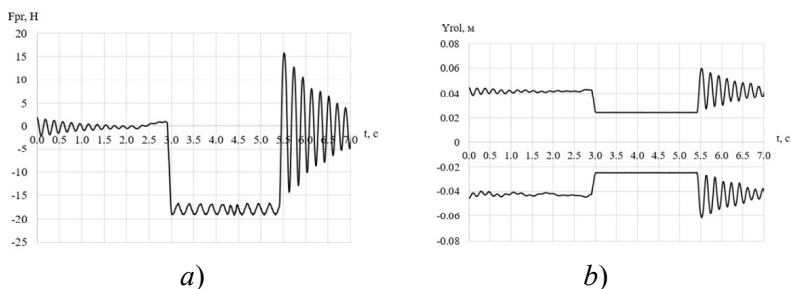


Рис. 9. Параметры подпружиненных роликов: а) сила на пружине тяг роликов; б) перемещение левого и правого роликов

Fig. 9. Parameters of spring-loaded rollers: a) the force on the spring of the roller rods; б) the movement of the left and right rollers

Величина силы на тканевых зажимах показана на рис. 10.

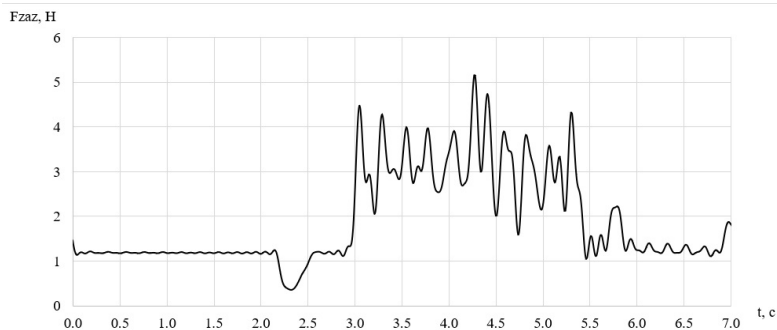


Рис. 10. Изменение силы на тягах с присоединёнными тканевыми зажимами
Fig. 10. Changing the force on the rods with attached fabric clips

В начале движения тканевые зажимы подпружинены с силой 1Н, в момент разворота «Луча» происходит снижение силы, далее при захвате и сжатии зажимов её увеличение до 4 Н и возвращение к 1Н после раскрытия захватов.

Выводы:

1. Полученные аналитически системы уравнений могут быть использованы для описания движения тел по сложным траекториям;
2. Разработанная имитационная модель цепного лесопосадочного аппарата позволила установить характеристики движения брикета саженца, позволяющие установить его в грунт, а также силовые параметры, необходимые для его удержания в захватах;
3. Имитационная модель разработана в отечественном программном обеспечении, что позволяет использовать её для обоснования параметров цепных лесопосадочных машин при проведении импортозамещения.

Сведения о финансировании исследования. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10010.

Благодарности. Авторы благодарят рецензентов за вклад в экспертную оценку статьи.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Бартенев И.М. Лесопосадочные машины. Теория. Исследование. Конструкция: монография. Воронеж: ВГЛУ, 2015. 219 с.

Бартенев И.М., Бухтояров Л.Д., Попиков В.П., Придворова А.В. Имитационная модель обрезчика ветвей в САПР // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 1(37). С. 153-160. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/20.

Беляев А.Н., Тришина Т.В., Новиков А.Е., Дьяченко Ю.В., Высоцкая И.А. Исследование движения колесной машины по криволинейной траектории // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2021. Т. 14. № 4(71). С. 21–29. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_4_21

Жданов Ю.М. Исследование и обоснование технологии заделки корневой системы сеянцев и параметров заделывающих элементов лесопосадочных машин : дисс. ... канд. техн. наук: 05.00.00. Волгоград, 1969. 196 с.

Клубничкин В. Е., Клубничкин Е.Е., Горбунов А.Ю., Дручинин Д.Ю. Разработка узла сочленения лесной погрузочно-транспортной машины // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 10. № 4(40). С. 217–226.

Титов П.И. Совершенствование технологического процесса и конструкции лесопосадочной машины для питомников : дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2006. 151 с.

Шабанов М.Л. Обоснование параметров сошника и рациональной компоновки рабочих органов лесопосадочной машины : дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2002. 152 с.

Шавков М.В. Обоснование параметров комбинированного сошника лесопосадочной машины : дисс. ... канд. техн. наук: 05.21.01. Воронеж, 2013. 212 с.

Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. Voronezh, 2021. No. 12004. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012004.

References

Bartenev I.M. Forestry machines. Theory. Study. Designs: monograph. Voronezh: VGLTU, 2015. 219 p. (In Russ.)

Bartenev I.M., Bukhtoyarov L.D., Popikov V.P., Pridvorova A.V. Simulation model of a branch cutter in CAD. *Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 1(37), pp. 153–160. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.1/20. (In Russ.)

Belyaev A.N., Trishina T.V., Novikov A.E., Dyachenko Yu.I., Vysotskaya I.A. Study of the movement of a wheeled vehicle along a curvilinear trajectory. *Bulletin of the Voronezh State Agrarian University*, 2021, vol. 14, no. 4(71), pp. 21–29. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2021_4_21 (In Russ.)

Bukhtoyarov L.D., Drapalyuk M.V., Pridvorova A.V. Simulation of the movement of hedge cutter links in the Simulink application of the Matlab package. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. Voronezh, 2021. No. 12004. DOI: 10.1088/1755-1315/875/1/012004.

Klubnichkin V.E., Klubnichkin E.E., Gorbunov A.Y., Druchinin D.Y. Development of the forwarder articulation joint. *Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 4(40), pp. 217–226. <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.4/18> (In Russ.)

Shabanov M.L. Substantiation of the coulter parameters and the rational layout of the working bodies of the forest planter: diss. ... cand. tech. Sciences: 05.21.01. Voronezh, 2002. 152 p. (In Russ.)

Shavkov M.V. Substantiation of the parameters of the combined coulter of a forest planter: diss. ... cand. tech. Sciences: 05.21.01. Voronezh, 2013. 212 p. (In Russ.)

Titov P.I. Improving the technological process and design of a tree planting machine for nurseries: diss. ... cand. tech. Sciences: 05.21.01. Voronezh, 2006. 151 p. (In Russ.)

Zhdanov Yu.M. Research and substantiation of the technology of embedding the root system of seedlings and the parameters of the embedding elements of forest planting machines: diss. ... cand. tech. Sciences: 05.00.00. Volgograd, 1969. 196 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 19.03.2024

Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н., Шавков М.В., Петков А.Ф., Попов М.А. Имитационная модель для анализа кинематики лесопосадочного аппарата цепного типа // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 301–314. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.301-314

В настоящее время при создании лесных культур почти повсеместно отдается предпочтение посадкам. Для охвата механизированной посадкой леса всех имеющихся площадей необходимо создание новых лесопосадочных машин. Одним из направлений совершенствования технологического процесса механизированной посадки является усовершенствование и разработка новых механизмов для подачи семян (саженцев) в посадочную щель, образуемую сошником. Для обоснования параметров лесопосадочного аппарата необходимо определить параметры движения его звеньев. Для анализа кинематики лесных машин используют автоматизированные программные продукты, такие как SolidWorks, Matlab/Simulink. Однако применение зарубежного программного обеспечения не отвечает современным тенденциям, поэтому нами были использованы отечественные программные комплексы. Трехмерная модель цепного лесопосадочного аппарата была выполнена в среде 3D-проектирования КОМПАС-3D. Полученные на основании геометрических параметров трехмерной модели аналитические системы уравнений были введены в разрабатываемую имитационную модель. Таким образом, имитационная модель движения цепного лесопосадочного аппарата разработана с учетом геометрических параметров конструкции и аналитических систем, описывающих движение захватов с саженцем. Проведённый в программном комплексе моделирования механических систем «Универсальный механизм 9.0» имитационный эксперимент позволил определить характеристики движения брикета саженца, необходимые для установки его в грунт, а также силовые параметры в захватах для его удержания. Установлены положения звеньев спроектированного рабочего органа лесопосадочной машины на всем протяжении времени моделирования. Определены моменты времени подачи саженца и брикета для заданных входных величин. Определены траектории движения брикета в плоскости посадки и его скорость. Определены силы на пружинах, достаточные для удержания в захватах саженца с брикетом.

Ключевые слова: лесопромышленный комплекс, лесопосадочные машины, кинематика, сажающий аппарат, имитационное моделирование.

Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Lysych M.N., Shavkov M.V., Petkov A.F., Popov M.A. Simulation model for analyzing the kinematics of chain-type forest planting machine. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 301–314 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.301-314

At present, planting is almost universally favored in the establishment of forest crops. In order to cover all available areas with mechanized planting it is necessary to create new forest planting machines. One of the directions of improving the technological process of mechanized planting is the improvement and development of new mechanisms for feeding seedlings (saplings) into the planting slot formed by the coulter. To justify the parameters of the forest planting apparatus, it is necessary to determine the movement parameters of its links. To analyze the kinematics of forest machines use automated software such as SolidWorks, Matlab/Simulink. However, the use of foreign software does not meet modern trends, so we used domestic software packages. The three-dimensional model of the chain planter was made in the 3D-design environment KOMPAS-3D. Analytical systems of equations obtained on the basis of geometric parameters of the three-dimensional model were entered into the developed simulation model. Thus, the simulation model of motion of the chain planting machine was developed taking into account the geometric parameters of the design and analytical systems describing the motion of the grippers with a seedling. The simulation experiment carried out in the software package of modeling mechanical systems «Universal Mechanism 9.0» allowed to determine the characteristics of the movement of the seedling briquette necessary for its installation in the ground, as well as force parameters in the grippers for its retention. The positions of the links of the designed working body of the planting machine are established throughout the simulation time. The time points of the seedling and briquette feeding for the specified input values are determined. The trajectories of the briquette movement in the landing plane and its speed are determined. The forces on the springs are determined, sufficient to hold the seedling with a briquette in the grips.

Key words: timber industry complex, planting machines, kinematics, planting machine, simulation modeling.

БУХТОЯРОВ Леонид Дмитриевич – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук, доцент. ORCID: 0000-0002-7428-0821. SPIN-код: 9081-6485. WoS ResearcherID: AAO-5129-2020. Scopus AuthorID: 57207453672.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: vglta-mlx@yandex.ru

BUKHTOYAROV Leonid D. – PhD (Technical), Associate Professor, Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0002-7428-0821. SPIN-code: 9081-6485. WoS ResearcherID: AAO-5129-2020. Scopus AuthorID: 57207453672.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: vglta-mlx@yandex.ru

МАЛЮКОВ Сергей Владимирович – доцент кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0003-2098-154X. SPIN-код: 9520-4147. WoS ResearcherID: N-2656-2016. Scopus AuthorID: 57202542928.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: malyukovsergey@yandex.ru

MALYUKOV Sergey V. – PhD (Technical), Associate Professor Department of Forestry Mechanization and Machine Design of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0003-2098-154X. SPIN-code: 9520-4147. WoS ResearcherID: N-2656-2016. Scopus AuthorID: 57202542928.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: malyukovsergey@yandex.ru

ЛЫСЫЧ Михаил Николаевич – доцент кафедры лесной промышленности, метрологии, стандартизации и сертификации Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-3764-3873. SPIN-код: 3555-2111. WoS ResearcherID: N-3089-2016. Scopus AuthorID: 57207472657.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: miklynea@yandex.ru

LYSYCH Mikhail N. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Forest Industry, Metrology, Standardization and Certification of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0002-3764-3873. SPIN-code: 3555-2111. WoS ResearcherID: N-3089-2016. Scopus AuthorID: 57207472657.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: miklynea@yandex.ru

ШАВКОВ Михаил Викторович – руководитель отдела логистики и снабжения ООО «Русгидроком (РГК)», кандидат технических наук. ORCID: 0000-0003-3700-7508. SPIN-код: 1307-0358.

394040, ул. Мазлумова, д. 25, г. Воронеж, Россия. E-mail: shavkovmv@mail.ru

SHAVKOV Mikhail V. – PhD (Technical), Head of Logistics and Supply Department, Rushydrocom (RGK) LLC. ORCID: 0000-0003-3700-7508. SPIN-code: 1307-0358.

394040. Mazlumova str. 25. Voronezh. Russia. E-mail: shavkovmv@mail.ru

ПЕТКОВ Александр Федорович – инженер кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова. ORCID: 0000-0002-1765-6781. SPIN-код: 9778-7114. Scopus AuthorID: 57219482677.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: alexanderpetkoff@mail.ru

PETKOV Aleksandr F. – Engineer of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. ORCID: 0000-0002-1765-6781. SPIN-code: 9778-7114. Scopus AuthorID: 57219482677.

394087, Timiryazev str. 8, Voronezh, Russia. E-mail: alexanderpetkoff@mail.ru.

ПОПОВ Максим Александрович – аспирант кафедры механизации лесного хозяйства и проектирования машин ФГБОУ ВО «Воронежский государственный лесотехнический университет имени Г.Ф. Морозова». SPIN-код: 9081-4128.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: popovmaxim98@mail.ru

POPOV Maxim A. – PhD student of the Department of Forestry Mechanization and Machine Design of Voronezh State University of Forestry and Technologies named after G.F. Morozov. SPIN-code: 9081-4128.

394087, Timiryazev str. 8, Voronezh, Russia. E-mail: popovmaxim98@mail.ru

А.М. Кочнев, А.С. Кривоногова, Ю.Л. Пушков

ОБОСНОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ ВЫБОРА ТРАССЫ ВОЛОКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРИНЦИПОВ НАВИГАЦИИ

Введение. Научно-технический прогресс – единое взаимообусловленное поступательное движение науки и техники – в лесозаготовительной отрасли позволил резко увеличить уровень труда и операций, в некоторых случаях до 100%, однако значительного прогресса лесозаготовительного производства, что является элементом технологического прогресса, практически не наблюдается [Анисимов, Кочнев, 2010]. Трассы волоков при разработке схемы транспортного освоения лесосек проводятся интуитивно либо с использованием типовых схем и рекомендаций 30-40-летней давности.

Методика и результаты исследования. Организация лесосечных работ в лесозаготовительных предприятиях Российской Федерации отстает от современных методов организации, применяемых в передовых отраслях на основе современных измерительных средств.

В учебном пособии по выполнению научных исследований и аспирантских диссертаций Г.М. Анисимов [2011] доказал, что без научного, и главное, современного приборного обеспечения выбор оптимальных трасс движения машин по лесосеке весьма затруднен. Работников лесозаготовительных предприятий в основном интересует эксплуатационная эффективность работы трелевочных тракторов, определяемая технологической (транспортной) производительностью и удельной энергоемкостью процесса трелевки, а также удельной нагруженностью элементов конструкции [Анисимов, 1990]. Чаще всего лесозаготовители ограничиваются оценкой эксплуатационной эффективности работы трелевочного трактора только по двум первым показателям. В исследовательских и доводочных испытаниях макетных, опытных и серийных образцов колесных трелевочных тракторов в различных производственных и полигонных условиях применяется электроизмерительная аппаратура, элементная база которой и в настоящее время считается современной [Анисимов, 1990; Кочнев, 2008]. Получен патент на мобильный измерительный комплекс [Анисимов и др., 2005]. Отсутствие методики и приборного обеспечения научно обоснованного выбора трасс трелевочных волоков отрицательно влияет на эксплуатационную эффективность работы трелевочных тракторов и окружающую среду.

Для определения маршрута движения различных мобильных систем используют навигацию. В энциклопедическом представлении навигация – наука о способах и методах вождения судов, летательных аппаратов и т. д. Задача навигации – нахождение оптимального маршрута (траектории), определение местоположения и значения скорости и других параметров движения объекта [Навигация..., 1988]. Предлагается создавать карты лесосек, аналогичные навигационным, в которых должны отражаться почвенно-грунтовые, рельефные и другие свойства опорной поверхности, определяющие режимы работы машины.

Структура электроизмерительного комплекса и показатели оценки свойств волока будут определяться задачами исследования, которые могут значительно отличаться, например:

- сохранение подроста;
- снижение отрицательного воздействия техники;
- повышение эксплуатационной эффективности работы трактора и т. д.

Для решения поставленных задач необходимо измерять, регистрировать и математически обрабатывать результаты исследования показателей и процессов с применением теории вероятности. Знание угла излома шарнирно-сочлененной рамы и крутящего момента, подводимого к ведущим колесам, M_k позволит получить законы распределения касательной силы тяги для оценки динамики процесса, энергоемкости процесса, различных коэффициентов сопротивления движения, тягового коэффициента полезного действия и др. Число оборотов с нарастающим итогом турбинного колеса n_t и «пятого колеса» n_k позволят определить потери от буксования b . Угол уклона волока i позволит выделить сопротивление движению от уклона.

Перечень датчиков-преобразователей, размещенных на мобильном измерительном комплексе, позволит решить поставленные задачи исследования и исправить допущенные некорректности в теории движения лесосечных машин (рис. 1).

Многие десятилетия в вузовских учебниках [Лесные..., 1989; Анисимов, Кочнев, 2009] тяговый баланс лесосечных и лесотранспортных машин, движущихся равномерно со скоростью до 25 км/ч, записывается так:

$$P_k = P_f \pm P_i + P_{кр}, \quad (1)$$

где P_k – касательная сила тяги; P_f – сила сопротивления качению; P_i – сила сопротивления подъему; $P_{кр}$ – крюковая сила тяги.

При этом:

$$P_f = f \cdot G, \quad (2)$$

где f – коэффициент сопротивления качению; G – вес машины, включая приходящуюся на нее полезную нагрузку.

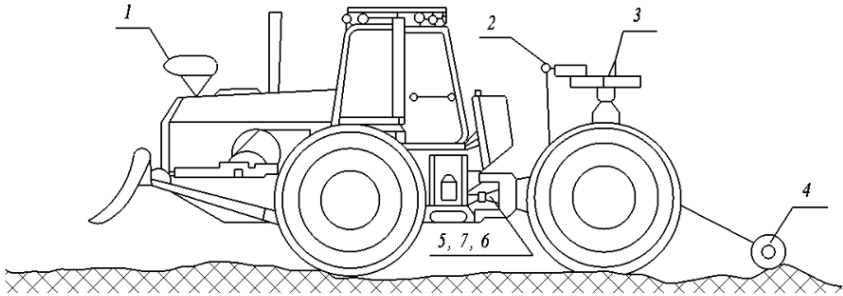


Рис. 1. Колесный лесопромышленный трактор, оснащенный измерительным оборудованием: 1 – ДУСУ (датчик угловых скоростей унифицированный); 2 – датчик измерения уклона волока; 3 – стабилизированная платформа; 4 – датчик отметки оборотов «Пятое колесо»; 5 – датчик крутящего момента на турбинном колесе; 6 – датчик отметки оборотов турбинного колеса; 7 – датчик излома шарнирно-сочлененной рамы

Fig. 1. Wheeled forestry tractor equipped with measuring equipment: 1 – AVUS (angular velocity unified sensor); 2 – drawbar slope measurement sensor; 3 – stabilized platform; 4 – «Fifth wheel» speed mark sensor; 5 – torque sensor on the turbine wheel; 6 – turbine wheel speed mark sensor; 7 – articulated frame fracture sensor

Модели (1) и (2) приняты из теории движения автомобилей общего назначения, в движении которых доминирует прямолинейное. С нашей точки зрения они некорректны для трелевочных машин. При трелевке пачки древесины трелевочный трактор может до 70% времени движения находиться в режиме поворота с разными радиусами кривизны [Анисимов, Кочнев, 2009], при этом на движение воздействует сопротивление от поворота. Это сопротивление может значительно превосходить P_f , но в формулах тягового баланса не учитывается. Это серьезная ошибка в теории движения трелевочных тракторов и систем. Для решения поставленных задач исследований предлагается ввести коэффициент сопротивления движению f_d :

$$f_d = f + f_n + f_c, \quad (3)$$

где f_n – коэффициент сопротивления повороту; f_c – коэффициент сопротивления скольжению древесины по почвогрунту лесосеки.

Значение коэффициента сопротивления f_n и силы сопротивления от поворота могут быть измерены, зарегистрированы и математически обработаны аппаратурой описанного выше мобильного измерительного комплекса. Тогда коэффициент сопротивления дороги (волоки) ϕ можно записать:

$$\phi = f_d \pm i, \quad (4)$$

где i – подъем, %.

Выделение поворота в движении трелевочного трактора с определением показателей поворота: коэффициента f_n , угловой скорости кривизны траектории движения и времени прохождения поворота – позволит оценивать влияние трассы волока на кинематику и динамику движения трелевочной системы.

Введение новых показателей значительно расширяет теорию движения трелевочного трактора.

Заключение. Обоснованные показатели оценки взаимодействия трелевочного трактора с опорной поверхностью и методы их приборного определения позволят выбирать из большой совокупности рациональные трассы волоков, трелевка древесины по которым обеспечит максимальную эксплуатационную эффективность работы трелевочного трактора.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Анисимов Г. М. Эксплуатационная эффективность трелевочных тракторов. М.: Лесн.пром-сть, 1990. 207 с.

Анисимов Г. М. Кафедре лесных гусеничных и колесных машин восемьдесят лет: учебно-методическое пособие. СПб.: СПбГЛТУ, 2011. 204 с.

Анисимов Г.М., Григорьев И.В., Кочнев А.М., Патакин В.И., Иванов В.А. Патент № 48052 на полезную модель «Мобильный измерительный комплекс». Бюлл. №25, опубл. 10.09.2005.

Анисимов Г. М., Кочнев А.М. Лесотранспортные машины: учебное пособие. СПб.: Лань, 2009. 448 с.

Анисимов Г. М., Кочнев А.М. Основы научных исследований лесных машин: учебник. 2-е изд., испр. СПб.: Лань, 2010. 528 с.

Кочнев А. М. Рабочие режимы отечественных колесных трелевочных тракторов: монография. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2008. 519 с.

Лесные машины: учебник. М.: Лесн. пром-сть, 1989. 512 с.

Навигация // Советский энциклопедический словарь. 1988. С. 854.

References

Anisimov G.M. Ekspluatatsionnaya effektivnost' trelevochnykh traktorov. M.: Lesn. prom-st', 1990. 207 p. (In Russ.)

Anisimov G.M. Kafedre lesnykh gusenichnykh i kolesnykh mashin vosem'desyat let: uchebno-metodicheskoye posobiye. St. Petersburg: SPbSFTU, 2011. 204 p. (In Russ.)

Anisimov G.M., Grigoryev I.V., Kochnev A.M., Patyakin V.I., Ivanov V.A. Patent no. 48052 na poleznuyu model “Mobilny izmeritelny kompleks”. Bull. no. 25, publ. 09.10.2005. (In Russ.)

Anisimov G.M., Kochnev A.M. Lesotransportnye mashiny: uchebnoye posobiye. St. Petersburg: Lan', 2009. 448 p. (In Russ.)

Anisimov G.M., Kochnev A.M. Osnovy nauchnykh issledovaniy lesnykh mashin: uchebnik. 2-e izd., ispr. St. Petersburg: Lan', 2010. 528 p. (In Russ.)

Kochnev A.M. Rabochiye rezhimy otechestvennykh kolesnykh trelevochnykh traktorov: monografiya. St. Petersburg: Izd-vo Politehnicheskogo un-ta, 2008. 519 p. (In Russ.)

Lesnye mashiny: uchebnik. M.: Lesn. prom-st', 1989. 512 p. (In Russ.)

Navigatsiya. *Sovetskiy enciklopedicheskiy slovar'*, 1998, p. 854. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 25.06.2023

Кочнев А.М., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л. Обоснование показателей выбора трассы волока с использованием принципов навигации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 315–321. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.315-321

Работники лесозаготовительной отрасли зачастую ограничиваются оценкой эксплуатационной эффективности работы трелевочного трактора только по двум показателям: транспортной производительности и удельной энергоемкости процесса трелевки – но для достижения рационального использования лесозаготовительной техники необходимо современное приборное обеспечение выбора оптимальных трасс движения машин по лесосеке. Предлагается создавать карты лесосек, аналогичные навигационным, в которых должны отражаться почвенно-грунтовые, рельефные и другие свойства опорной поверхности, определяющие режимы работы машины. Для решения поставленных задач необходимо измерять, регистрировать и математически обрабатывать результаты исследования показателей и процессов с применением теории вероятности. Знание угла излома шарнирно-сочлененной рамы и крутящего момента, подводимого к ведущим колесам, позволит получить законы распределения касательной силы тяги для оценки динамики процесса, энергоемкости процесса, различных коэффициентов сопротивления движения, тягового коэффициента полезного действия и др. При трелевке пачки древесины трелевочный трактор может до 70% времени движения находиться в режиме поворота с разными радиусами кривизны, при этом на движение воздействует сопротивление от поворота. Это сопротивление может значительно превосходить силу сопротивления движению. Для решения поставленных задач исследований предлагается ввести в тяговый баланс лесосечных и

лесотранспортных машин коэффициент сопротивления движению, как сумму коэффициента сопротивления повороту и коэффициента сопротивления скольжения древесины. Обоснованные показатели оценки взаимодействия трелевочного трактора с опорной поверхностью и методы их приборного определения позволяют выбирать из большой совокупности рациональные трассы волоков, трелевка древесины по которым обеспечит максимальную эксплуатационную эффективность работы трелевочного трактора.

Ключевые слова: трелевочный трактор, информационные системы, коэффициент сопротивления, эксплуатационная эффективность.

Kochnev A.M., Krivonogova A.S., Pushkov Yu.L. Substantiation of indicators for choosing a dragging route using the principles of navigation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 315–321 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.315-321

Workers in the logging industry are often limited to assessing the operational efficiency of a skidder by only two indicators, transport productivity and specific energy intensity of the skidding process, but in order to achieve rational use of logging equipment modern instrumentation is needed to select the optimal routes for the movement of machines in the cutting area. It is proposed to create maps of cutting areas, similar to navigational ones, which should reflect the soil-ground, relief and other properties of the supporting surface that determine the operating modes of the machine. To solve the tasks set, it is necessary to measure, record and mathematically process the results of the study of indicators and processes using the theory of probability. Knowledge of the fracture angle of the articulated frame and the torque supplied to the drive wheels will make it possible to obtain the laws of distribution of the tangential thrust force for assessing the dynamics of the process, the energy intensity of the process, various coefficients of resistance to movement, traction efficiency, etc. When skidding a pack of wood, the skidder can be in rotation mode with different radii of curvature up to 70% of the time, while the resistance from turning affects the movement. This resistance can far exceed the force of resistance to movement. To solve the research problems, it is proposed to introduce the coefficient of resistance to movement into the traction balance of logging and forest transport machines, as the sum of the coefficient of resistance to rotation and the coefficient of sliding resistance of wood. Reasonable indicators for assessing the interaction of a skidder with a supporting surface and methods for their instrumental determination will make it possible to choose from a large set of rational dragging routes, the skidding of wood along which will allow you to get the maximum operational efficiency of the skidder.

Keywords: skidding, information systems, drag coefficient, operational efficiency.

КОЧНЕВ Александр Михайлович – профессор кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: tlsd@spbftu.ru

KOCHNEV Alexander M. – DSc (Technical), Professor of the Department of Technology of Materials, Structures and Structures made of Wood, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: tlsd@spbftu.ru

КРИВОНОГОВА Александра Станиславовна – заведующий кафедрой прикладной механики и инженерной графики Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 8399-6121.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: KrivonogovaAS@spbftu.ru

KRIVONOGOVA Aleksandra S. – PhD (Technical), Head of the Department of Applied Mechanics and Engineering Graphics, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 8399-6121.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: KrivonogovaAS@spbftu.ru

ПУШКОВ Юрий Леонидович – доцент кафедры лесного машиностроения, сервиса и ремонта Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. SPIN-код: 5633-1797.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: PushkovYL@spbftu.ru

PUSHKOV Yuriy L. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Forestry Engineering, Service and Repair, St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-code: 5633-1797.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: PushkovYL@spbftu.ru

С.В. Посыпанов, Ш.Г. Зарипов, И.А. Песков

**ОБОСНОВАНИЕ ГИДРОДИНАМИЧЕСКИХ НАГРУЗОК,
ВОСПРИНИМАЕМЫХ УСТРОЙСТВОМ
ДЛЯ СПЛОТКИ ЧЕТЫРЁХПАКЕТНЫХ ПУЧКОВ
В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ**

Введение. Доставка древесного сырья потребителям из наиболее удалённых лесных массивов, где сосредоточены его основные запасы, зачастую экономически оправдывается только при осуществлении её по водным путям. При этом важно эффективно использовать разветвлённые речные сети лесных регионов. Эта разветвлённость обеспечивается в значительной степени большим количеством малых и средних рек. Как правило, начальный мелководный участок составляет небольшую часть всей длины маршрута транспортировки лесоматериалов. В связи с этим после прохождения такого участка целесообразно увеличение размеров лесотранспортных единиц как в плане, так и по высоте с целью уменьшения удельных затрат, связанных с последующей буксировкой. Доставка древесного сырья по речным сетям, организованная по принципу единого транспортного пакета [Харитонов, Посыпанов, 2008], предполагает не только повышение эффективности этого процесса, но и лучшее соответствие критерию экологичности. При такой доставке на начальном мелководном участке лесоматериалы транспортируют в малогабаритных пакетах объёмом 3–5 м³. После прохождения такого участка из них формируют двухъярусные четырёхпакетные пучки. Целостность пакетов при этом не нарушается, что исключает потери лесоматериалов, обеспечивает высокую производительность и технологичность сплотки. Возможность укладки в одну сплоточную единицу пакетов с большим и малым запасом плавучести создаёт хорошие предпосылки для осуществления транспортировки по воде лиственных и хвойных тонкомерных сортиментов.

Отметим, что двухъярусные единицы в течение ряда лет проходили апробацию в производственных условиях. Апробация оказалась успешной, но пока их сплотка осуществлялась только на зимних плотбищах. Применение этих сплоточных единиц по основному назначению возможно только при наличии устройств, обеспечивающих возможность их формирова-

ния на воде. Авторами статьи разработано соответствующее устройство относительно простой конструкции, позволяющее осуществлять сплотку рассматриваемых единиц с помощью техники, имеющейся у лесозаготовителей. Сведения о конструкции устройства, технологии работ, выполняемых с его использованием, приведены в статье [[Посыпанов, Песков, 2018]. Здесь ограничимся лишь краткой информацией о нём, которая нужна для понимания излагаемого в данной работе материала. Схематичное изображение устройства (вид сверху) приведено на рис. 1.

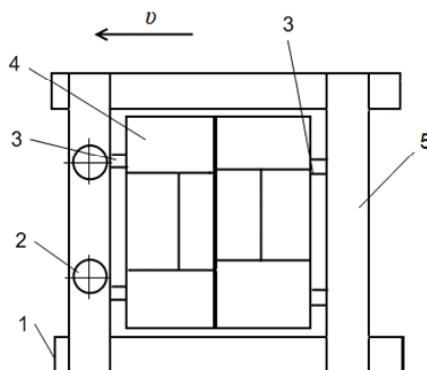


Рис. 1. Схема устройства:

1 – понтон; 2 – выюха; 3 – отсекатель;
4 – пакет лесоматериалов, 5 – мостик

Fig. 1. Device diagram:

1 – pontoon; 2 – coil; 3 – cut-off;
4 – package of timber, 5 – bridge

Плавучее основание устройства состоит из двух понтонов, соединённых по краям мостиками. На мостиках установлены поднимаемые отсекатели, между которыми находится рабочая камера. По бокам рабочую камеру ограничивают закреплённые на понтонах щиты (на рис. 1 не показаны), поднимаемые при транспортировке устройства. Они предотвращают выход пакетов нижнего яруса за пределы рабочей камеры. На нижнем по течению мостике установлены выюхи с проволокой, используемой для обвязки сформированной сплоточной единицы.

Пакеты нижнего яруса заводят в устройство по воде после поднятия верхних по течению отсекателей. Затем отсекатели опускают и погружают

ком укладывают на нижний ярус верхние пакеты. Сформированную сплottedую единицу обвязывают и, подняв нижние по течению отсекатели, погружатиком вытаскивают из рабочей камеры. Возможны другие варианты работы.

Эксплуатация устройств предполагается преимущественно в период подъёма уровней на реках, то есть при существенных скоростях течения. Высока вероятность перемещения устройств с места на место в связи с относительно небольшими объёмами работ на отдельных объектах. На каждом объекте предусматривается крепление устройства. В таких условиях особенно важно минимизировать затраты на его обеспечение. При этом крепление должно быть надёжным. Добиться этого можно лишь при наличии достаточно точной информации об усилиях, действующих на эксплуатируемое устройство со стороны набегающего потока. Выполнив анализ исследований по взаимодействию различных объектов с водной средой, в частности [Корпачев, Рябоконь, 1978; Чекалкин, 1981; Войткунский, 1988], мы убедились в необходимости описываемой здесь работы.

Цель исследования – научное обоснование величины гидродинамических усилий, воспринимаемых устройством для сплотки двухъярусных чептырёхпакетных сортиментных пучков, в процессе эксплуатации.

Метод исследования – теоретико- экспериментальный.

Теоретически нагрузка F , воспринимаемая зафиксированным в русле водоёма устройством от набегающего потока, зависит от большого количества факторов. К их числу следует отнести форму и размеры подводной части самого устройства и находящейся в его рабочей камере сплottedой единицы. В этот перечень входит также скорость набегающего потока u . В соответствии с классическими положениями гидромеханики [Войткунский и др., 1982; Kleinstreuer, 2010] влияние оказывают плотность ρ и вязкость μ жидкости, в данном случае воды, а также величина гравитационной постоянной g . Сказывается на величине рассматриваемой нагрузки и близко расположенное дно. Зависимость означенной нагрузки от перечисленных факторов целесообразно привести к безразмерному виду, воспользовавшись положениями теории размерностей и подобия [Родионов, 1982]. Это позволяет существенно сократить количество определяющих факторов, упростив таким образом дальнейшие действия. Кроме того, при этом устанавливаются критерии подобия, необходимые в случае проведения экспериментов на моделях. В таких случаях форму и размеры объектов характеризуют одним абсолютным размером и группой относительных. В нашем случае за такой абсолютный размер принята осадка устройства T

с размещённой в ней сплоточной единицей. В качестве примера отметим, что такую геометрическую характеристику, как глубина потока H в месте расположения устройства, мы заменили безразмерной относительной глубиной H/T . При принятых параметрах устройства и базового варианта сплоточной единицы факторы, характеризующие форму и размеры их подводной части, являются фиксированными. Следовательно, из рассматриваемой зависимости они могут быть исключены.

Выполнив ряд действий по приведению указанной зависимости к безразмерному виду, получили:

$$\frac{F}{\rho \cdot v^2 T^2} = \gamma \left(\frac{\mu}{\rho v T}; \frac{gT}{v^2}; \frac{H}{T} \right). \quad (1)$$

При фиксированных соотношениях осадки T с другими геометрическими характеристиками устройства и сплоточной единицы площадь мидела Ω пропорциональна квадрату осадки. Коэффициент пропорциональности обозначили символом k . Умножили левую и правую части уравнения (1) на величину $2/k$, в результате получили:

$$\frac{2F}{\rho \cdot v^2 \Omega} = \frac{2}{k} \gamma \left(\frac{\mu}{\rho v T}; \frac{gT}{v^2}; \frac{H}{T} \right). \quad (2)$$

Первое выражение в скобках зависимости (2) – преобразованный вариант числа Рейнольдса Re , второе – числа Фруда Fr [Войткунский и др., 1982].

$$Re = \frac{\rho v T}{\mu}; \quad (3)$$

$$Fr = \frac{v}{\sqrt{gT}}. \quad (4)$$

Дробь в левой части указанной зависимости равна величине, которую принято называть коэффициентом гидродинамического сопротивления. Обозначим его символом c . Уравнение (2) записали иначе:

$$c = \frac{2}{k} \gamma \left(\frac{1}{Re}; \frac{1}{Fr^2}; \frac{H}{T} \right). \quad (5)$$

Выражение (5) привели к более простому виду, поменяв знак функции:

$$c = \beta \left(Re; Fr; \frac{H}{T} \right). \quad (6)$$

Вновь обратившись к левой части уравнения (2), запишем формулу, которую будем использовать для определения исследуемой гидродинамической нагрузки:

$$F = c\rho\Omega v^2 / 2. \quad (7)$$

В данном случае под площадью миделя понимается суммарная площадь подводной части поперечного сечения плавучего основания устройства и сплottedной единицы, размещённой в его рабочей камере.

Чтобы зависимость (6) представить в виде математического выражения, с помощью которого можно было бы вычислять значения коэффициента гидродинамического сопротивления c , потребовалось проведение экспериментальных исследований. Проведение натурных экспериментов в данном случае весьма затруднительно, поэтому прибегли к физическому моделированию. Полученные безразмерные комплексы в скобках уравнения (6), как было отмечено, являются критериями подобия при указанном моделировании. Известно, что обеспечить подобие по числам Re и Fr одновременно практически невозможно [Войткунский и др., 1982]. Из выражений (3), (4) следует, что при проведении опытов в воде в первом случае модельную скорость необходимо увеличивать по сравнению с натурной, во втором – уменьшать. Согласно существующей классификации [Войткунский и др., 1982] исследуемое устройство, в особенности со сплottedной единицей в рабочей камере, следует отнести к плохообтекаемым телам, причём места отрыва пограничного слоя в данном случае являются фиксированными. В результате исследований, проведённых с такими телами, установлено, что составляющая трения в общем гидродинамическом сопротивлении у них незначительна [Чекалкин, 1981; Войткунский и др., 1982]. Число Re влияет в основном именно на эту составляющую, то есть здесь оно является фактором, слабо влияющим на результат. Поэтому, изменив знак функции, можем упростить зависимость (6):

$$c = \delta\left(Fr; \frac{H}{T}\right). \quad (8)$$

Таким образом, требовалось провести двухфакторный эксперимент. Определяющие факторы одновременно являются критериями подобия.

Модель плавучего основания устройства изготовили из оцинкованной стали в масштабе 1:20. Длина понтонов модели 300 мм, ширина 75 мм, высота 50 мм, расстояние между ними 320 мм. Осадка модели при опущенных боковых щитах 80 мм, осадка понтонов 25 мм.

Подобие по критерию Фруда при указанном масштабе модели достигается в соответствии с формулой (4) при условии, что скорости в модельных условиях будут меньше натуральных в $\sqrt{20} = 4,47$ раза.

Экспериментальные исследования проводили на небольшом водотоке, имеющем связь с морем. Из-за приливов и отливов скорость течения в месте проведения опытов периодически менялась. Это изменение происходило достаточно медленно, то есть при дублировании опытов скорость оставалась практически неизменной.

Экспериментальную установку фиксировали в русле реки при помощи металлических сваяк (рис. 2). Две свайки, расположенные выше по течению, предназначены для крепления балки, снабженной двумя кронштейнами, на которых закрепляли направляющие блоки. Под верхним блоком на кронштейне фиксировали электронные весы, на которые устанавливали груз. Исследуемую модель соединяли с этим грузом при помощи кордовой нити, огибающей указанные направляющие блоки. Положение весов с грузом было таковым, что ветвь кордовой нити, идущая от него к верхнему направляющему блоку, была вертикальной. В рабочей камере устройства размещали модель двухъярусного четырёхпакетного сортиментного пучка (рис. 3), изготовленную в соответствующем масштабе. Размеры этой модели приняты по базовому варианту натурной сплочной единицы [Харитонов, Посыпанов, 2008].

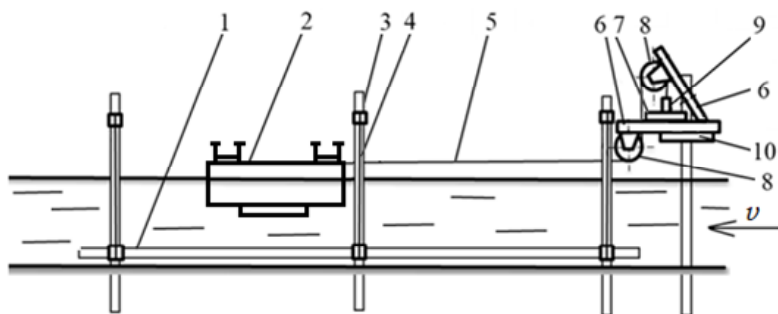


Рис. 2. Экспериментальная установка:

- 1 – донный щит; 2 – исследуемая модель; 3 – свайка; 4 – гибкая связь подвески щита;
5 – нить крепления модели; 6 – консоль; 7 – весы; 8 – блок; 9 – груз; 10 – балка

Fig. 2. Experimental setup:

- 1 – bottom shield; 2 – model under study; 3 – pile; 4 – flexible connection
of the shield suspension; 5 – fastening thread of the model; 6 – console; 7 – scales;
8 – block; 9 – cargo; 10 – beam

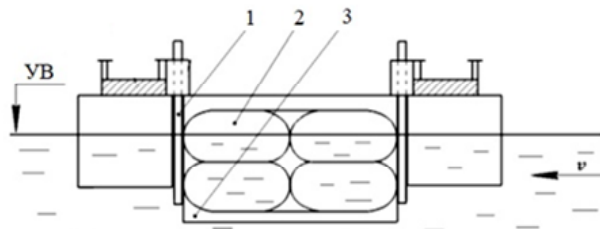


Рис. 3. Расположение четырёхпакетного пучка в устройстве:

1 – отсекабель; 2 – четырёхпакетный пучок; 3 – щит

Fig. 3. Location of the formed four-packet bundle in the device:

1 – cut-off; 2 – four-packet bundle; 3 – shield

Влияние близости дна исследовали с помощью утяжелённого горизонтального щита с размерами $3,75 \times 2,5$ м. По боковым краям щита выполнены отверстия, по три с каждой стороны. В них размещались сваи. Щит соединяли с верхними концами свай гибкими связями. Изменяя их длину, устанавливали требуемую глубину над щитом.

Измерение скорости течения выполняли с помощью гидрометрической вертушки ГР-21М.

Усилие, воспринимаемое моделью от потока воды, устанавливали с помощью весов. Снимали показания по ним при откреплённой модели, затем – при присоединённой, находящейся под воздействием потока. Определяли их разность с точностью 0,01 г. Результат переводили в килограммы и, умножив его на ускорение свободного падения, вычисляли искомую нагрузку в ньютонах. Используя полученные опытным путём данные и выражение (7), находили соответствующие величины коэффициента c .

Опыты проводили, ориентируясь на получение регрессионной модели второго порядка. При двух варьируемых факторах в случае использования полного факторного плана требуемое количество серий опытов равно 9 [Пижури, 2005]. Каждая серия опытов предусматривала пять повторений. Количество повторений установлено с учётом значения, вычисленного по известной формуле [Пижури, 2005]. Перед её использованием провели пробную серию опытов. При статистической обработке её результатов получили коэффициент вариации, равный 4,69%. Задали уровень значимости 0,05, допустимую погрешность 5%. При числе степеней свободы 9 критерий Стьюдента $t = 2,26$ [Пижури, 2005]. В результате упомянутого вычисления и установили требуемое количество повторений. В итоге общее количество опытов оказалось равным 45. Опыты пробной серии не входят в это число.

Упомянутый план предполагает трёхуровневое варьирование факторов. Число Фруда варьировали в диапазоне 0,108–0,192. Он обеспечивается

в данном случае при натуральных скоростях 0,445–0,800 м/с, при модельных – 0,100–0,179 м/с. Диапазон относительной глубины – 1,93–2,61.

В ходе первичной статистической обработки результатов по сериям опытов установили, в частности, что коэффициент вариации не превышает 4,79%, показатель точности – 2,14%. Это свидетельствует о достаточно качественном проведении экспериментов. Критерий Кохрена расчётный – 0,32, табличное значение – 0,36 [Пижури, 2005]. Данное соотношение расчётного и табличного значений позволяет считать дисперсии опытов однородными. Проверку на нормальность распределения выполнили для пробной серии по критерию Шапиро-Уилка. Убедились, что указанное распределение можно считать нормальным. При этом использовали программу «IBM SPSS Statistics».

Результаты выполненных проверок позволили воспользоваться регрессионным анализом. Его реализовали также с использованием программы «IBM SPSS Statistics». Выполнив обработку экспериментальных данных по методу «Ввод», получили следующее уравнение регрессии:

$$c = 1,726 - 0,989 \frac{H}{T} + 2,572 Fr + 0,148 \left(\frac{H}{T} \right)^2 - 6,107 Fr^2 + 0,307 \frac{H}{T} Fr. \quad (9)$$

Соответствующая ему достоверность аппроксимации – 0,809 [Weisberg, 2005].

При использовании метода «Пошаговый» получили более простую модель:

$$c = 0,998 - 0,271 \frac{H}{T} + 1,436 Fr. \quad (10)$$

Достоверность аппроксимации у неё оказалась, естественно, несколько ниже, чем у предыдущей, а именно 0,769.

Использование полученных уравнений совместно с формулой (7) даёт возможность определить гидродинамическую нагрузку на исследуемое устройство, находящееся в рабочем положении со сформированной сплошной единицей в рабочей камере.

Интерпретация результатов. Наличие регрессивных моделей позволяет выполнить анализ влияния основных определяющих факторов на величину коэффициента гидродинамического сопротивления. Очевидно, что этот анализ будет более достоверным в случае использования уравнения (9). Наглядно демонстрируют влияние определяющих факторов на выходную величину графики, построенные с применением указанной модели и представленные на рис. 4, рис. 5. Коэффициент гидродинамического сопротивления с увеличивается с возрастанием числа Фруда (рис. 4), причём

интенсивность этого увеличения с приближением к верхней границе исследованного диапазона Fr несколько снижается. При изменении числа Фруда от 0,108 до 0,192 коэффициент c увеличивается на 17–29%. Этот диапазон обусловлен различием относительных глубин.

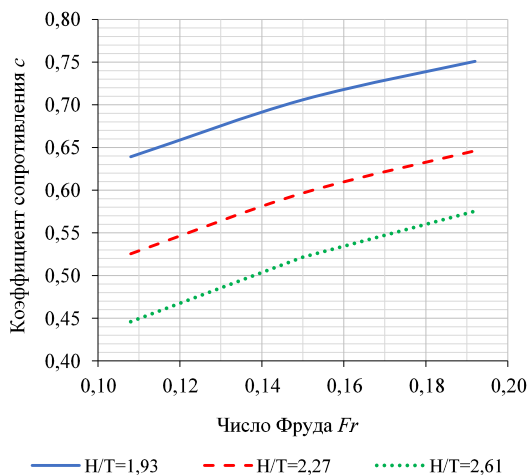


Рис. 4. Зависимость коэффициента c от числа Fr
 Fig. 4. Dependence of coefficient c on the number Fr

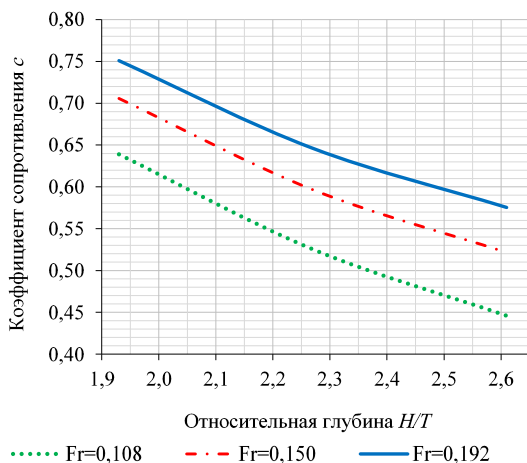


Рис. 5. Зависимость коэффициента c от относительной глубины H/T
 Fig. 5. Dependence of coefficient c on relative depth of H/T

Более существенное увеличение коэффициента c происходит с уменьшением фактора H/T (рис. 5). Это увеличение в пределах рассматриваемых глубин составляет 30–43%. Здесь диапазон обусловлен разницей чисел Фруда. Интенсивность изменения коэффициента c снижается с увеличением относительной глубины.

Судя по уравнению регрессии (9), имеет место взаимодействие двух рассматриваемых определяющих факторов. При относительно небольшом снижении достоверности аппроксимации указанное взаимодействие уже не проявляется, в уравнении (10) соответствующего слагаемого нет. То есть указанное взаимодействие слабое; аналогичный вывод можно сделать и по графикам (рис. 4, рис. 5).

Выводы:

1. Опираясь на положения гидромеханики, определили перечень факторов, которые могут влиять на величину исследуемой гидродинамической нагрузки. Зависимость этой нагрузки от определяющих факторов преобразовали, представив уменьшившееся количество её составляющих в безразмерном виде. Привели аргументацию допустимости игнорирования в данном случае числа Рейнольдса как определяющего фактора и критерия подобия. В результате установили, что коэффициент гидродинамического сопротивления устройства с определёнными геометрическими пропорциями можно рассматривать как функцию числа Фруда и относительной глубины потока;

2. По результатам экспериментальных исследований на физической модели устройства получили уравнения регрессии (9), (10), позволяющие вычислять значения указанного коэффициента. С его использованием по формуле (7) определяется гидродинамическая нагрузка на устройство в процессе эксплуатации;

3. Из двух основных определяющих факторов, согласно модели (9), на коэффициент гидродинамического сопротивления в данном случае более существенно влияет относительная глубина. Увеличение упомянутого коэффициента c её уменьшением в исследованном диапазоне составляет 30–43%, разброс обусловлен разницей чисел Фруда. Интенсивность изменения коэффициента c снижается с увеличением относительной глубины;

4. При изменении числа Фруда от 0,108 до 0,192 коэффициент c увеличивается на 17–29%, разброс обусловлен различием глубин. Интенсивность этого увеличения с приближением к верхней границе исследованного диапазона Fr несколько снижается. Заметим, что число Фруда линейно зависит от скорости. Гидродинамическая нагрузка линейно зависит от исследуемого коэффициента, при этом согласно формуле (7) она ещё непосредственно зависит от квадрата скорости. То есть влияние скорости тече-

ния на гидродинамическую нагрузку наиболее значительно. Взаимодействие между определяющими факторами проявляется относительно слабо;

5. Результаты исследования предоставляют возможность обеспечения надёжного крепления рассматриваемого устройства, избежав при этом чрезмерных затрат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Войткунский Я.И., Фадеев Ю.И., Федяевский К.К. Гидромеханика. Л.: Судостроение, 1982. 568 с.

Войткунский Я.И. Сопротивление движению судов. 2-е изд., доп. и перераб. Л.: Судостроение, 1988. 288 с.

Корпачев В.П., Рябоконь Ю.И. Сопротивление воды движению лесотранспортных единиц в водном потоке: учеб. пособие. Красноярск: РИО СТИ, 1978. 62 с.

Пижурин А.А. Основы научных исследований в деревообработке. М.: МГУЛ, 2005. 305 с.

Посыпанов С.В., Песков И.А. Технология навигационной сплотки двухъярусных пакетных лесотранспортных единиц // Аллея Науки: [науч.-практ. электр. журнал]. 2018. № 5-8(21). С. 73–75.

Родионов П.М. Метод подобия и его применение к решению задач лесосплава. Л.: ЛТА, 1982. 84 с.

Харитонов В.Я., Посыпанов С.В. Опыт внедрения единого транспортного пакета вместо молевого лесосплава // ИВУЗ. Лесной журнал. 2007. № 1. С. 45–52.

Чекалкин К.А. Движение твердых тел в жидкости. Л.: ЛТА, 1981. 48 с.

Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics. Springer Netherlands, 2010. 622 p.

Weisberg S. Applied Linear Regression: Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 329 p.

References

Chekalkin K.A. Dvizheniye tverdykh tel v zhidkosti [Movement of solids in liquids]. L.: LTA, 1981. 48 p. (In Russ.)

Kleinstreuer C. Modern Fluid Dynamics. Springer Netherlands, 2010. 622 p.

Korpachyov V.P., Ryabokon' Yu.I. Soprotivleniye vody dvizheniyu lesotransportnykh yedinit v vodnom potoke: uchebnoye posobiye [Resistance of water to the movement of timber transport units in a water flow]. Krasnoyarsk: STI, 1978. 62 p. (In Russ.)

Pizhurin A.A. Osnovy nauchnykh issledovaniy v derevoobrabotke [Basics of scientific research in woodworking]. M.: MGUL, 2005. 305 p. (In Russ.)

Posypanov S.V., Peskov I.A. Tekhnologiya navigatsionnoy splotki dvukh'yarusnykh paketnykh lesotransportnykh yedinit [Technology of navigational joining of two-tier

packages for transport of timbers]. *Alleya Nauki*: [nauch.-prakt. elektr. zhurnal], 2018, no. 5-8(21), pp. 73–75. (In Russ.)

Rodionov P.M. Metod podobija i yego primeneniye k resheniyu zadach lesosplava [Similarity method and its application to solve timber rafting problems]. L.: LTA, 1982. 84 p. (In Russ.)

Voytkunskiy Ya.I., Fadeev Iu.I., Fedjaevskij K.K. Gidromekhanika [Hydromechanics]. L.: Sudostroyeniye, 1982. 568 p. (In Russ.)

Voytkunskiy Ya.I. Soprotivleniye dvizheniyu sudov [Resistance to ship traffic]. L.: Sudostroyeniye, 1988. 288 p. (In Russ.)

Weisberg S. Applied Linear Regression: Third edition. Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 2005. 329 p.

Haritonov V.Ya., Posypanov S.V. Opyt vnedreniya edinogo transportnogo paketa vmesto molevogo lesosplava [Experience of introducing transport package instead of drift floating]. *IVUZ. Lesnoj zhurnal*, 2007, no. 1, pp. 45–52. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 07.05.2024

Посыпанов С.В., Зарипов Ш.Г., Песков И.А. Обоснование гидродинамических нагрузок, воспринимаемых устройством для сплотки четырёхпакетных пучков в процессе его эксплуатации // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 322–335. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.322-335

Доставка древесного сырья потребителям из наиболее удалённых лесных массивов, где сосредоточены его основные запасы, зачастую экономически оправдывается только при осуществлении её по водным путям. При эффективном использовании разветвлённых речных сетей обычно начальная относительно короткая часть маршрута доставки проходит по мелководным участкам. После их преодоления экономически целесообразно укрупнение лесотранспортных единиц. Рассматриваемое в статье устройство в совокупности с техникой лесозаготовителей позволяет эффективно и экологично выполнять укрупнение сплотовых единиц. С его помощью из малогабаритных пакетов без нарушения их целостности сплавляют двухъярусные четырёхпакетные пучки. Эксплуатация устройства предполагает его перестановки с места на место. Описываемое исследование направлено на получение достоверных сведений о гидродинамических усилиях, воспринимаемых устройством в процессе эксплуатации. Такие сведения позволят минимизировать затраты на крепление устройств при соблюдении условия его надёжности. Установлены факторы, которые теоретически влияют на величину указанных усилий. Зависимость между означенными усилием и факторами в результате преобразований представлена как функция коэффициента гидродинамического сопротивления от сократившегося ряда безразмерных величин. Приведена аргументация допустимости игнорирования в данном случае числа

Рейнольдса как определяющего фактора и критерия подобия. В результате доказано, что коэффициент гидродинамического сопротивления устройства с определёнными геометрическими пропорциями можно рассматривать как функцию числа Фруда и относительной глубины потока. Установлена содержащая упомянутый коэффициент аналитическая формула, предназначенная для определения исследуемой нагрузки. По результатам опытов на физической модели устройства, выполненных по полному факторному плану с обеспечением подобия, получены уравнения регрессии, позволяющие вычислять значения указанного коэффициента. Знание этой величины позволяет определять по упомянутой аналитической формуле гидродинамическую нагрузку на устройство с расположенной в нём сплottedной единицей. С помощью полученного уравнения регрессии выполнена оценка характера и степени влияния числа Фруда, относительной глубины на величину коэффициента гидродинамического сопротивления.

Ключевые слова: лесосплав, устройство для сплottedки, пакеты лесоматериалов, гидродинамическая нагрузка.

Posypanov S.V., Zaripov Sh.G., Peskov I.A. Justification of hydrodynamic loads perceived by the device for forming four-packet beams during its operation. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 322–335 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.322-335

Delivery of wood raw materials to consumers from the most remote forest areas, where its main reserves are concentrated, is often economically justified only when carried out by waterways. When branched river networks are used effectively, the initial relatively short part of the delivery route usually passes through shallow water areas. After overcoming them, it is economically feasible to enlarge timber transport units. The device discussed in the article, together with logging equipment, allows for the enlarge of timber transport units in an efficient and environmentally friendly manner. With its help, small-sized packages without compromising their integrity are assembled into two-tier, four-packet bundles. Operating the device involves moving it from place to place. The described study is aimed at obtaining reliable information about the hydrodynamic loads acting on the device in operating condition. Their presence will ensure its reliable fastening, while avoiding excessive costs. Factors have been identified that theoretically influence the magnitude of these loads. The relationship between the hydrodynamic load and the determining factors is reduced to dimensionless form. The admissibility of excluding the Reynolds number from the number of determining factors is substantiated. Dimensionless geometric factors characterizing the shape of the underwater part of the device and the base timber transport unit are fixed. As a result of theoretical studies, an analytical formula was established by which the hydrodynamic load perceived by the device should be determined, and the dependence of the hydrodynamic resistance coefficient on the Froude number and the relative depth at the place of work was obtained, presented in symbolic form. Using this dependence, experimental studies were carried out on a physical model in compliance with similarity using a full factorial design. Based on

the results of the experiments, regression models were obtained to calculate the values of the hydrodynamic resistance coefficient in the case under consideration. Knowing this value allows one to determine, using the mentioned analytical formula, the hydrodynamic load on the device with the timber transport unit located in it. An analysis of the influence of the main determining factors on the value of the coefficient under study was carried out.

Key words: timber rafting, forming device, timber packages, hydrodynamic load.

ПОСЫПАНОВ Сергей Валентинович – профессор Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова, доктор технических наук, профессор. ResearcherID: ABF-6542-2021. ORCID: 0000-0003-0600-7089. SPIN-код: 8592-0690.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: s.posypanov@narfu.ru

POSYPANOV Sergey V. – DSc (Technical), Professor, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ResearcherID: ABF-6542-2021. ORCID: 0000-0003-0600-7089. SPIN-code: 8592-0690.

163002. Severnoj Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: s.posypanov@narfu.ru

ЗАРИПОВ Шакур Гаянович – профессор Лесосибирского филиала Сибирского государственного университета науки и технологий им. академика М.Ф. Решетнева, доктор технических наук, доцент. ORCID: 0000-0001-6483-2453.

662543, ул. Победы, д. 29, г. Лесосибирск, Красноярский край, Россия. E-mail: zaripov_sh@mail.ru

ZARIPOV Shacur G. – DSc (Technical), Associate Professor, Lesosibirsk Branch of Reshetnev Siberian State University of Science and Technology. ORCID: 0000-0001-6483-2453

662543. Pobedy str. 29. Lesosibirsk. Krasnoyarsk Krai. Russia. E-mail: zaripov_sh@mail.ru

ПЕСКОВ Илья Александрович – аспирант Северного (Арктического) федерального университета имени М.В. Ломоносова. ORCID: 0000-0002-7068-0326.

163002, наб. Северной Двины, д. 17, г. Архангельск, Россия. E-mail: peskovily@gmail.com

PESKOV Ilya A. – PhD Student, Northern (Arctic) Federal University named after M.V. Lomonosov. ORCID: 0000-0002-7068-0326.

163002. Severnoj Dviny emb. 17. Arkhangelsk. Russia. E-mail: peskovily@gmail.com

3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

УДК 674.07

О.А. Белова, А.Н. Чубинский

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ОТВЕРЖДЕНИЯ УКРЫВИСТЫХ ГРУНТОВ НА ПОЛИУРЕТАНОВОЙ ОСНОВЕ

Введение. В последние десятилетия использование древесноволокнистых плит средней плотности (МДФ) в производстве мебельных фасадов и стеновых панелей получило широкое распространение. МДФ характеризуются меньшей по сравнению с древесностружечными плитами эмиссией формальдегида, стабильностью формы, возможностью формировать на их поверхности рисунок. У производителей главным образом ценится их простота в обработке [Коваленко, Белова, 2021].

Из-за особенностей структуры МДФ для обеспечения качественного покрытия технологическая система отделки (лакокрасочный материал и технология его применения) предполагает использование лакокрасочных материалов (ЛКМ) с высоким сухим остатком, значительной наполненностью и высокой укрывистостью. Технические условия эксплуатации изделий из МДФ диктуют требования к высокой прочности, а также механической и химической устойчивости покрытия. ЛКМ на основе полиуретана позволяют создать требуемую систему отделки МДФ для мелких и средних производств [Буглай, 1973; Леонович, 1998; Белова, 2021; Чубинский и др., 2022; Williams, 2012].

Как правило, система отделки МДФ включает: слой изолирующего покрытия для стабилизации структуры волокон, особенно в зонах обработки фрезерованием; два слоя укрывистого высоконаполненного грунта для заполнения пор и выравнивания поверхности; финишный слой эмали. Для обеспечения требуемого качества покрытия используется значительный объем высоконаполненного грунтовочного материала. Стремясь сократить этап отверждения и уменьшить количество операций, производители часто

увеличивают расход грунта и повышают температурные режимы сушки. Однако превышение этих параметров может привести к дефектам, таким как кратеры, растрескивание и снижение адгезии, а также к снижению эффективности производственного процесса и увеличению затрат на электроэнергию и материалы.

Целью исследования является оптимизация производственных процессов и улучшение качества конечных покрытий.

Для достижения этой цели были исследованы параметры процесса, такие как температура отверждения и расход лакокрасочного материала. В ходе исследования проведены эксперименты для определения оптимальных условий сушки, а также разработана математическая модель, позволяющая прогнозировать время отверждения на основе ключевых параметров процесса.

В отделке МДФ активно используются двухкомпонентные (2К) полиуретановые (ПУ) продукты. Для получения таких ЛКМ применяются смеси гидроксилсодержащих алкидных или полиэфирных смол и полиизоцианатов. Содержание нелетучих веществ в этих смолах варьируется в пределах 50–75%. Долговечность полиуретановых покрытий обусловлена уникальной способностью изоцианатных (NCO) и гидроксильных (ОН) групп формировать прочные трехмерные структуры [Шампетье, Рабатэ, 1960; Сорокин и др., 1989; Мушкарлова, Белова, 2023]. Для наполнения в состав полиуретанового связующего включают разнообразные добавки, в том числе органические наполнители и природные минералы, однако наиболее широко используемым пигментированным наполнителем на сегодняшний день является диоксид титана (TiO_2) (E171). Диоксид титана (TiO_2) — бесцветное твёрдое кристаллическое вещество. Несмотря на отсутствие цвета, в значительных количествах он служит чрезвычайно эффективным белым пигментом при условии высокой степени очистки. Является полиморфным соединением и встречается в трех основных кристаллических формах: анатаз (октаэдрит), рутил и брукит. TiO_2 практически не поглощает свет в видимой части спектра и обладает высокой рефрактивной способностью, что позволяет ему эффективно покрывать поверхности, скрывая подложку. Способность диоксида титана отражать свет в видимой части спектра зависит от диаметра его частиц. При размере частиц 0,2 мкм достигается максимальная суммарная рассеянность света для всех видимых длин волн [Костин, 2015].

Процесс отверждения лакокрасочных покрытий на поверхностях МДФ может происходить как при естественных условиях, так и в специально со-

данных искусственных обстоятельствах. В настоящее время существуют различные способы ускорения или интенсификации сушки (отверждения) ЛКП на древесине: конвективный, инфракрасный, с применением ультрафиолетовых лучей, микроволновый, аэроионизационный и др. Все способы работают при сообщении отверждаемому покрытию дополнительной энергии [Онегин, 1983; Газеев, Исаков, 2014; Газеев, 2016; Газеев, Исаков, 2016]. Конвективные установки с обогревом покрытия горячим воздухом имеют широкое распространение на мебельных производствах. Этот метод предпочтителен благодаря своей простоте в эксплуатации и настройке, а также возможности достаточно равномерно передавать тепло на поверхность изделий [Цой, 2002; Рыбин, 2007]. «При подводе тепла конвекцией осуществляется нагрев системы лакокрасочный материал — подложка. Длительность передачи тепла от поверхности лакокрасочного материала к нижней его границе зависит от теплопроводности и толщины покрытия» [Жуков, Онегин, 1993].

Процесс отверждения двухкомпонентных полиуретановых ЛКМ является ключевым этапом в формировании прочного и долговечного покрытия. Эти материалы состоят из двух основных компонентов – гидроксилсодержащей смолы (основа) и изоцианата (отвердитель), которые смешиваются непосредственно перед нанесением. Дополнительным компонентом состава является растворитель, который также регулирует реологические свойства продукта, такие как вязкость, плотность, растекаемость и т. д. При отверждении протекает ряд химических реакций, однако при эквивалентных соотношениях групп NCO и OH реакция уретанообразования является преобладающей. На скорость образования трёхмерной сетки полимера, а значит и на процесс отверждения в целом, существенно влияют такие параметры олигомеров, как молекулярная масса (ММ), функциональность, разветвлённость и температура стеклования [Сорокин, 1989; Кофтык и др., 2012]. Температура оказывает значительное влияние на процесс отверждения. При повышении температуры возрастает кинетическая энергия молекул, что ускоряет их движение и способствует более быстрой полимеризации. Температура также способствует ускоренному испарению растворителя из ЛКМ [Жуков, Онегин, 1993].

Задача любого производства — повышение эффективности рабочих процессов, при этом сокращение времени отверждения ЛКМ без ущерба для качества покрытия является одной из ключевых задач. Контролируемые на производстве параметры, такие как температура и расход материа-

лов, оказывают существенное влияние на процесс отверждения и могут быть оптимизированы для достижения этой цели.

В рамках данной работы проведено исследование зависимости скорости отверждения полиуретановых укрывистых грунтов высокого наполнения от толщины наносимого слоя (расхода) ЛКМ и температуры отверждения. Полученные данные позволят разработать рекомендации по оптимальному расходу ЛКМ и параметрам процесса отверждения, в конечном итоге – созданию отечественных защитно-декоративных систем.

Материалы и методика исследования. Исследования проводили в соответствии с ГОСТ 19007-2023 «Материалы лакокрасочные. Метод определения времени и степени высыхания.» (ISO 9117-5:2012, NEQ). Методическая сетка эксперимента приведена в табл. 1.

Таблица 1

Методическая сетка эксперимента

Methodological Framework of the Experiment

Задачи исследования	Постоянные факторы		Переменные факторы		Выходной параметр	Количество результатов измерений			
	Наименование	Значение	Наименование	Значение		Кол-во опытов	Кол-во результатов одного опыта	Кол-во наблюдений	Общее кол-во наблюдений
Исследование зависимости скорости отверждения полиуретановых укрывистых грунтов от толщины наносимого слоя (расхода) ЛКМ и температуры	Подложка Вязкость, с, по ВЗ-246	МДФ 20	Температура, °С	20 40 60	Степень высыхания №1 ГОСТ 19007-2023, мин	3	13	4	156
			Толщина наносимого слоя (расхода), мкм на м ²	100 150 200					
	Вид нанесения	Распыление	Условные обозначения образца	1 2 3 4					

Примечание: Условные обозначения образца: 1 – ПУ грунт Akzo Nobel 111.58 (Италия); 2 – ПУ грунт Helios TT (Россия); 3 – ПУ грунт Aromatik PA-1552 (Турция); 4 – ПУ грунт Techno color PPS40 (Россия).

Результаты исследования. Полученные данные представлены в виде графической зависимости продолжительности отверждения от температуры при разной толщине слоя на рис. 1–4.

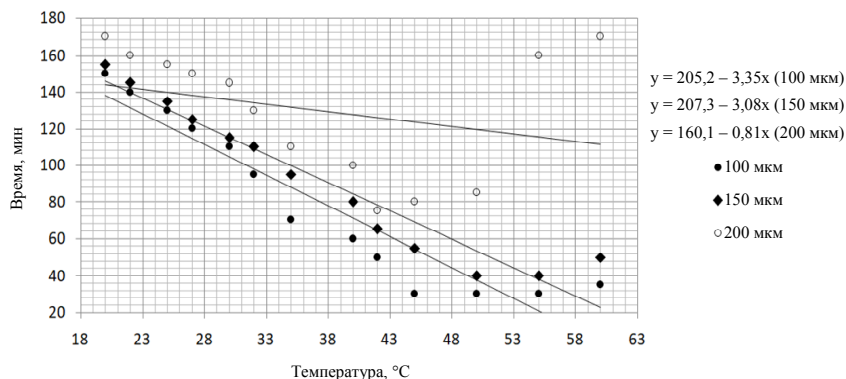


Рис. 1. Зависимость продолжительности отверждения от температуры, грунт №1
 Fig. 1. Dependence of the deviation rate on temperature, primer № 1

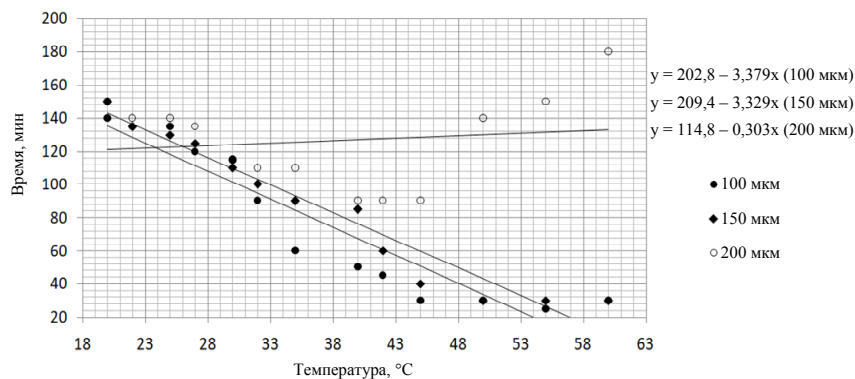


Рис. 2. Зависимость продолжительности отверждения от температуры, грунт №2
 Fig. 2. Dependence of the deviation rate on temperature, primer № 2

Исследования подтверждают, что время высыхания полиуретановых покрытий существенно зависит от температуры и толщины слоя. При температурах свыше 50 °С происходит заметное увеличение времени отверждения, которое усиливается с ростом толщины слоя, демонстрируя зна-

чительный скачок этого параметра. Для тонких слоев время отверждения пленки прямо пропорционально их толщине и температуре. Однако для толстых покрытий это правило нарушается из-за образования поверхностной пленки, которая затрудняет выведение растворителя из нижних слоев к поверхности и приводит к дефициту кислорода и водорода, необходимых для процесса уретановой полимеризации [Жуков, Онегин, 1993]. Важно отметить, что проведенные испытания при температурах от 45 до 60 °С показали нестабильность процесса сушки для слоев толщиной 200 мкм и эти режимы не рекомендованы к эксплуатации.

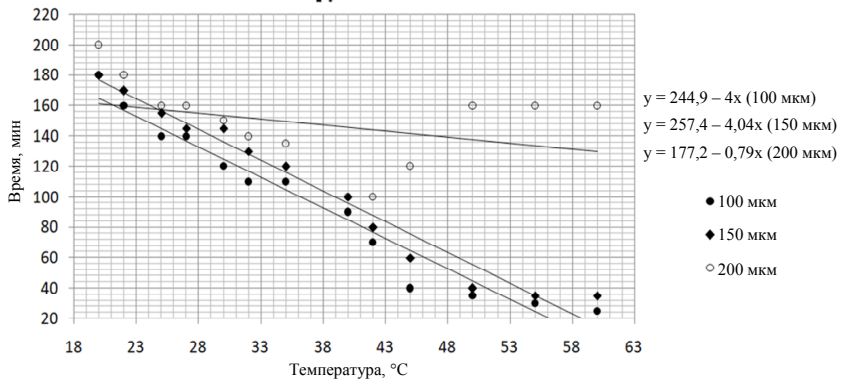


Рис. 3. Зависимость продолжительности отверждения от температуры, грунт №3
Fig. 3. Dependence of the deviation rate on temperature, primer № 3

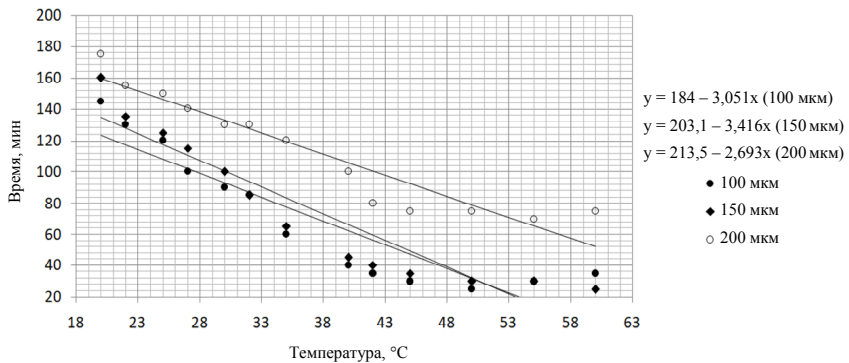


Рис. 4. Зависимость продолжительности отверждения от температуры, грунт № 4
Fig. 4. Dependence of the deviation rate on temperature, primer № 4

Математические модели процесса получены на основе результатов полного факторного эксперимента [Чубинский и др., 2018]

Уравнение регрессии для зависимости продолжительности отверждения от температуры и толщины слоя (табл. 2) представляет собой линейную модель, которая в общем виде выражается следующим образом:

$$y = \beta_0 + \beta_1x_1 + \beta_2x_2, \tag{1}$$

где y — продолжительность отверждения, β_0 — свободный член, β_1 — коэффициент при переменной x_1 (температура), β_2 — коэффициент при переменной x_2 (толщина слоя), x_1 — температура, x_2 — толщина слоя.

Таблица 2

Уравнения регрессии

Regression equations

Грунт	Уравнение
№1	$y=117,06-2,41x_1+0,49x_2$
№2	$y=102,48-2,14x_1+0,49x_2$
№3	$y=148,68-2,94x_1+0,52x_2$
№4	$y=136,92-3,05x_1+0,42x_2$

Уравнения линейной регрессии, разработанные для каждого типа грунта, демонстрируют зависимость времени высыхания от толщины слоя и температуры, позволяя количественно оценить влияние указанных факторов на процесс высыхания.

Целевая функция Z , которая представляет собой обобщенную модель для прогнозирования времени высыхания, выражается как среднее значений всех четырёх грунтов:

$$\begin{aligned} Z &= (1/4) * [(117,06 - 2,41x_1 + 0,49x_2) + (102,48 - 2,14x_1 + 0,49x_2) + \\ &\quad + (148,68 - 2,94x_1 + 0,52x_2) + (136,92 - 3,05x_1 + 0,42x_2)]; \\ Z &= 126,285 - 2,635x_1 + 0,48x_2. \end{aligned} \tag{2}$$

Коэффициент детерминации (R^2), указывающий на долю объясненной вариации в данных, для этих моделей находится в пределах от 56% до 85,5%, что свидетельствует о достаточной точности моделей для применения в практических целях.

Визуализация уравнения регрессии на трехмерном графике (рис. 5) наглядно демонстрирует влияние температуры и толщины слоя на время отверждения. Полученная модель может быть использована для оптимизации процессов сушки полиуретановых грунтов в различных условиях.

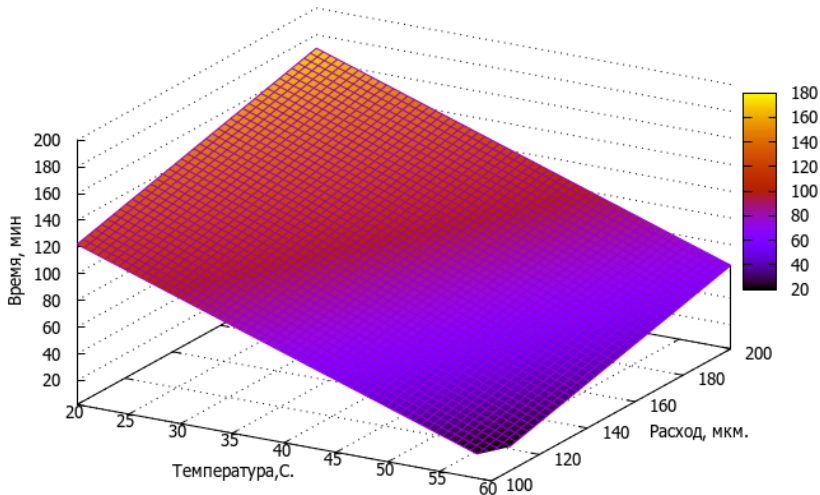


Рис. 5. Трехмерный график модели линейной зависимости продолжительности отверждения ЛКМ от расхода и температуры

Fig. 5. Three-dimensional graph of the model of linear dependence of paint drying coating on consumption and temperature

Для оптимизации продолжительности отверждения полиуретановых грунтов с учётом температурного режима и толщины наносимого слоя использован метод крутого восхождения. Результаты оптимизации приведены в табл. 3.

Начальные параметры:

- Температура (x_1): 20 °C
- Толщина слоя (x_2): 100; 125; 150 мкм.

Градиент целевой функции: $\nabla Z = (-2,635; 0,48)$.

Таблица 3

Оптимизация методом крутого восхождения

Optimization by the method of steepest ascent

Толщина слоя/расход (x_2), мкм	Оптимальная температура (x_1), °C	Минимальное время высыхания (Z), мин
100	46,35	52,15
125	45,79	53,94
150	45,22	55,84

В результате был выявлен эффективный температурный диапазон отверждения в пределах 44–46 °С. Установленные параметры могут быть интегрированы в технологический процесс с целью оптимизации условий сушки и обеспечения высокого качества покрытия, минимизируя риск дефектов. При этом требуется строгий контроль температурного режима и расхода материала (толщины слоя) для поддержания эффективности процесса. Однако, учитывая, что использованная модель предполагает линейные зависимости, которые могут не полностью учитывать сложные взаимодействия в реальных производственных условиях, необходимо проведение дополнительных исследований для дальнейшего уточнения и адаптации модели.

Заключение. Разработанные математические модели линейной регрессии обеспечивают количественную оценку этих факторов и могут быть применены для оптимизации производства. Установлено, что при нанесении слоев свыше 200 мкм и температурах выше 50 °С процесс отверждения становится нестабильным, что требует дальнейших исследований для уточнения моделей. Соблюдение рекомендуемых температурных режимов и расхода способствует значительной экономии энергии за счет снижения потребности в избыточном нагреве и сокращения времени сушки. Это в свою очередь уменьшает эксплуатационные расходы и повышает общую энергоэффективность производственного процесса. Полученные результаты и разработанные модели могут быть использованы при проектировании новых производственных линий, обеспечивая точные расчеты параметров сушки и отверждения, что позволит оптимизировать процесс на этапе планирования и избежать избыточных затрат.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Белова О.А. Испытание полиуретановых защитно-декоративных покрытий // *Ландшафтная архитектура, строительство, дизайн и обработка древесины: матер. I Всерос. студенческой конференции-вебинара*. СПб.: СПбГЛТУ, ИЛАСиОД, 2021. С. 5–9.

Буглай Б.М. *Технология отделки древесины*. М.: Лесн. пром-сть, 1973. 303 с.

Газеев М.В. Исследование режимных параметров ускоренной сушки лакокрасочных покрытий на древесине // *Труды БГТУ. Лесная и деревообрабатывающая промышленность*. 2016. № 2 (184). С. 140–144.

Газеев М.В., Исаков С.Н. Моделирование деформаций при высыхании лакокрасочного материала на металлической пластине // *Леса России и хозяйство в них*. 2014. № 2 (49). С. 38–40.

Газеев М.В., Исаков С.Н. Моделирование электрического поля при аэроионизационной сушке лакокрасочных покрытий на древесине // Вестник технологического университета. 2016. Т.19. № 20. С. 46–49.

Жуков Е.В., Онегин В.И. Технология защитно-декоративных покрытий древесины и древесных материалов. СПб.: Экология, 1993. 302 с.

Коваленко И.В., Белова О.А. Свойства полиуретановых эмалей // Ландшафтная архитектура, строительство, дизайн и обработка древесины: матер. I Всерос. студенческой конференции-вебинара. СПб.: СПбГЛТУ, ИЛАСиОД, 2021. С. 10–14.

Костин А.С. Математическое моделирование и оптимизация процесса получения наночастиц диоксида титана золь-гель методом: дисс. ... канд. тех. наук. М.: РХТУ им. Д.И. Менделеева, 2015. 169 с.

Кофтык В.А., Полякова М.Н., Листова О.В., Ямский В.А., Воробьева Л.Г. Формирование покрытий на основе полиуретановых ЛКМ. М.: ЛКМ-пресс, 2012. 13 с.

Леонович А.А. Физико-химические основы образования древесных плит. СПб.: ХИМИЗДАТ, 1998. 188 с.

Мушкарлова О.М., Белова О.А. Алгоритм снижения стоимости отделки столярных изделий лакокрасочными материалами на полиуретановой основе // Ландшафтная архитектура, строительство и обработка древесины: материалы научно-технической конференции СПбГЛТУ по итогам НИР 2022 г. СПб.: СПбГЛТУ, 2023. С. 8–13.

Онегин В.И. Формирование лакокрасочных покрытий древесины. Л.: Изд-во ЛГУ, 1983. 148 с.

Рыбин Б.М. Технология и оборудование защитнодекоративных покрытий древесины и древесных материалов: учебник для студентов вузов. М.: МГУЛ, 2007. 568 с.

Сорокин М.Ф., Кочнова З.А., Шодэ Л.Г. Химия и технология пленкообразующих веществ: учебник для вузов. М.: Химия, 1989. 480 с.

Цой Ю.И. Совершенствование технологии отделки изделий из древесины на основе воднодисперсионных лакокрасочных составов: дисс. ... д-ра техн. наук. СПб.: СПбГЛТА, 2002. 413 с.

Чубинский А.Н., Русаков Д.С., Батырева И.М., Варанкина Г.С. Методы и средства научных исследований. Методы планирования и обработки результатов экспериментов. СПб.: СПбГЛТУ, 2018. 104 с.

Чубинский А.Н., Коваленко И.В., Белова О.А. Выбор лакокрасочных материалов методом расстановки приоритетов // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: матер. VII Всерос. науч.-технич. конференции / под ред. А.А. Добровольского. СПб.: СПбГЛТУ, 2022. С. 55–58.

Шампетье Г., Рабатэ Г. Химия лаков, красок и пигментов. Т. 1. М.: ГХИ, 1960. 584 с.

Williams R.S. Finishing of Wood // Wood handbook – wood as an engineering material. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2012. P. 15–37.

References

Belova O.A. Testing of polyurethane protective and decorative coatings. *Landscape architecture, construction, design and wood processing*: materials of the I All-Russian student conference-webinar. St. Petersburg: ILASIOD, SPbGLTU, 2021, pp. 5–9. (In Russ.)

Buglay B.M. Technology of wood finishing. M.: Lesn. prom-st, 1973. 303 p. (In Russ.)

Chubinsky A.N., Rusakov D.S., Batyreva I.M., Varankina G.S. Methods and tools of scientific research. Methods of planning and processing of experimental results. St. Petersburg: SPbGLTU, 2018. 104 p. (In Russ.)

Chubinsky A.N., Kovalenko I.V., Belova O.A. Selection of paint materials by priority ranking method. *Forests of Russia: politics, industry, science, education*: materials of the VII All-Russian scientific and technical conference. Ed. by A.A. Dobrovolsky. St. Petersburg: SPbGLTU, 2022, pp. 55–58. (In Russ.)

Champetier G., Rabate G. Chemistry of varnishes, paints, and pigments. Vol. 1. M.: GKHI, 1960. 584 p. (In Russ.)

Gazeev M.V. Research of the accelerated drying mode parameters of paint coatings on wood. *Proceedings of BSTU. Forest and wood-processing industry*, 2016, no. 2(184), pp. 140–144. (In Russ.)

Gazeev M.V., Isakov S.N. Modeling of deformations during the drying of paint material on a metal plate. *Forests of Russia and management in them*, 2014, no. 2(49), pp. 38–40. (In Russ.)

Gazeev M.V., Isakov S.N. Modeling of the electric field during aeration drying of paint coatings on wood. *Bulletin of the Technological University*, 2016, vol. 19, no.20, pp. 46–49. (In Russ.)

Koftyuk V.A., Polyakova M.N., Listova O.V., Yamskiy V.A., Vorobyeva L.G. Formation of coatings based on polyurethane paint materials. M.: LKM-press, 2012. 13 p. (In Russ.)

Kostin A.S. Mathematical modeling and optimization of the process of obtaining titanium dioxide nanoparticles by the sol-gel method: diss. ... cand. of techn. sci. M.: RCTU named after D.I. Mendeleev, 2015. 169 p. (In Russ.)

Kovalenko I.V., Belova O.A. Properties of polyurethane enamels. *Landscape architecture, construction, design and wood processing*: materials of the I All-Russian student conference-webinar. St. Petersburg: ILASIOD, SPbGLTU, 2021, pp. 10–14. (In Russ.)

Leonovich A.A. Physicochemical foundations of the formation of wood-based panels. SPb.: KHIMIZDAT, 1998. 188 p. (In Russ.)

Mushkarova O.M., Belova O.A. Algorithm for reducing the cost of finishing joinery products with polyurethane-based paint materials. *Landscape architecture, construction and wood processing*: materials of the scientific and technical conference

of SPbGLTU based on the results of R&D in 2022. St. Petersburg: SPbGLTU, 2023, pp. 8–13. (In Russ.)

Onegin V.I. Formation of paint coatings for wood. L.: Publishing House of Leningrad University, 1983. 148 p. (In Russ.)

Rybin B.M. Technology and equipment for protective and decorative coatings of wood and wood materials: a textbook for university students. 3rd ed. M.: MGUL, 2007. 568 p. (In Russ.)

Sorokin M.F., Kochnova Z.A., Shode L.G. Chemistry and technology of film-forming substances: a textbook for universities. M.: Chemistry, 1989. 480 p. (In Russ.)

Tsoy Yu.I. Improvement of the technology of finishing wood products based on water-dispersion paint compositions: diss. ... d-ra of techn. sci. St. Petersburg: SPbGLTA, 2002. 413 p. (In Russ.)

Williams R.S. Finishing of Wood. *Wood handbook – wood as an engineering material*. Madison, WI: U.S. Dept. of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory, 2012, pp. 15–37.

Zhukov E.V., Onegin V.I. Technology of protective and decorative coatings for wood and wood materials. St. Petersburg: Ecology Publishing House, 1993. 302 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 11.06.2024

Белова О.А., Чубинский А.Н. Исследование процесса отверждения укрывистых грунтов на полиуретановой основе // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 336–349. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.336-349

Лакокрасочные материалы (ЛКМ) на полиуретановой основе широко используются для отделки древесноволокнистых плит средней плотности (МДФ), применяемых в производстве мебельных фасадов и стеновых панелей. Эти материалы характеризуются высокой прочностью, механической и химической устойчивостью. Процесс отверждения ЛКМ является ключевым этапом, определяющим качество конечного покрытия, и зависит от температуры и расхода. В работе проведено исследование процесса отверждения укрывистых полиуретановых грунтов с целью оптимизации условий производства. Экспериментальные исследования включали полный факторный эксперимент, позволивший установить зависимость продолжительности отверждения от ключевых параметров. Разработана математическая модель, позволяющая количественно оценить влияние температуры и расхода на время отверждения. Установлен оптимальный температурный диапазон для сушки полиуретановых грунтов, который минимизирует риск дефектов покрытия и обеспечивает высокое качество продукции. Результаты исследования могут быть использованы для оптимизации производственных процессов, что позволит снизить эксплуатационные расходы и повысить энергоэффективность. Статистическое

сравнение отечественных полиуретановых грунтов с зарубежными аналогами может существенно способствовать процессу импортозамещения, позволяя проводить сравнение и оценку эффективности. Разработка отечественных материалов с учетом полученных данных обеспечит более конкурентоспособное производство и независимость от импортных поставок.

Ключевые слова: лакокрасочные материалы (ЛКМ), полиуретановые грунты, МДФ (древесноволокнистые плиты), отверждение, расход, импортозамещение, оптимизация производственных процессов.

Belova O.A., Chubinsky A.N. Study of the Curing Process of Opaque Polyurethane-Based Primers. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 336–349 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.336-349

Polyurethane-based LKM are widely used for finishing medium-density fiberboards (MDF) employed in the production of furniture fronts and wall panels. These materials are characterized by high strength, as well as mechanical and chemical resistance. The curing process of these coatings is a critical stage that determines the quality of the final finish and is influenced by temperature and application rate. This study investigates the curing process of opaque polyurethane primers with the aim of optimizing production conditions. The experimental research included a full factorial experiment, which allowed for establishing the dependency of curing time on key parameters. A mathematical model was developed to quantitatively assess the influence of temperature and application rate on curing time. The optimal temperature range for drying polyurethane primers was determined, which minimizes the risk of coating defects and ensures high product quality. The results of the study can be used to optimize production processes, reducing operational costs and increasing energy efficiency. A statistical comparison of domestic polyurethane primers with foreign analogs may significantly contribute to the import substitution process, enabling the comparison and assessment of efficiency. The development of domestic materials based on the obtained data will ensure more competitive production and independence from imported supplies.

Keywords: coatings (LKM), polyurethane primers, MDF (medium-density fiberboard), curing, consumption, import substitution, optimization of production processes.

БЕЛОВА Ольга Александровна – аспирант кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: obllkm@mail.ru

BELOVA Olga A. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University. 194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: oblkm@mail.ru

ЧУБИНСКИЙ Анатолий Николаевич – профессор кафедры технологии материалов, конструкций и сооружений из древесины Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук. Researcher ID: I-9432-2016. ORCID: 0000-0001-7914-8056.

194021, Институтский пер., д. 5, лит. У, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

CHUBINSKIY Anatoliy N. – DSc (Technical), professor St. Petersburg State Forest Technical University. Researcher ID: I-9432-2016. ORCID: 0000-0001-7914-8056.

194021. Institute per. 5. Let. U. St. Petersburg. Russia. E-mail: a.n.chubinsky@gmail.com

Е.В. Кантиева, С.Н. Снегирева, А.Д. Платонов

ВЛАГОПРОВОДНОСТЬ ЯДРОВОЙ ДРЕВЕСИНЫ СОСНЫ В СТВОЛЕ ДЕРЕВА

Введение. Технология переработки древесины включает обязательный процесс её высушивания или увлажнения. Данные процессы являются достаточно энергозатратными, и их трудно интенсифицировать. Процесс удаления влаги из древесины является одним из первичных [Сотникова, Соколова, 2019]. Он зависит от многих факторов. Сушка древесины повышает её качество, предупреждает формо- и размероизменяемость деталей и др. [Михайлова и др., 2020]. Реализация процессов увлажнения или сушки древесины невозможна без сведений о величине тока влаги [Арциховская, 1957; Алпаткина, 1967]. Показателем интенсивности тока влаги в древесине является коэффициент её влагопроводности. Он характеризует количество влаги, перемещаемое в единицу времени через единицу площади при разности концентрации влаги в 1 кг/м^3 на 1 м толщины [Серговский, 1952].

Исследованию влагопроводности древесины посвящены работы ряда отечественных ученых, из которых наибольший вклад внесли Н.В. Арциховская, Р.П. Алпаткина, А.В. Лыков, П.С. Серговский; из зарубежных ученых – Д.Ф. Мартлей, К. Эгнер и др. Полученные этими учеными численные значения коэффициента влагопроводности противоречивы. Последующие исследования влагопроводности древесины показали, что на перемещение влаги в древесине оказывает влияние ряд факторов. По данным ряда работ [Платонов и др., 2019; Скуратов и др., 2022; Платонов и др., 2023б] наибольшее влияние на влагопроводность древесины оказывают: её порода, плотность и твердость [Platonov et al., 2022; Snegireva et al., 2022], направление тока влаги, температура [Tyukavina, Gudina, 2020], порода и структура её анатомических элементов, влажность и др. В работах [Михайлова и др., 2020; Платонов и др., 2023а; Chiniforush et al., 2019; Zhan et al., 2020; Afshari, Malek, 2022] отмечается влияние пористости древесины на её влагопроводность. Установлено, что увеличение размера полостей клеточных стенок оказывает большее влияние на повышение влагопроводности древесины, чем увеличение температуры. Большое влияние на перемещение влаги в древесине оказывает форма влаги. Так, при влажности ниже точки насыщения волокон ток влаги зависит от изменчивости плотности и структуры древесины [Платонов и др., 2023б].

В справочной литературе представлены значения коэффициента влагопроводности для большинства основных древесных пород, произрастающих на территории РФ и имеющих большое промышленное значение как в нашей стране, так и за рубежом. Эти значения коэффициента влагопроводности приведены для древесины, расположенной в нижней части ствола на высоте 1,3 м. Данные сведения о величине коэффициента влагопроводности не учитывают изменчивость плотности древесины по высоте ствола. Как показывают исследования, плотность древесины сосны, произрастающей в сухих борах лесостепной зоны РФ, понижается в среднем на 1,4% на каждый метр высоты ствола [Платонов и др., 2023а], при этом происходит повышение пористости древесины. Снижение плотности по высоте ствола оказывает одно из определяющих влияний на влагопроводность древесины.

Определение интенсивности тока влаги в древесине – процесс сложный и трудозатратный. Поэтому одним из способов определения, широко используемых в настоящее время, является моделирование. В научной литературе представлен ряд теоретических моделей диффузного переноса влаги в древесине ниже точки насыщения [Hofstetter, Eitelberger, 2011; Chiniforush et al., 2019; Zhan et al., 2020; Afshari, Malek, 2022]. Представленные модели диффузии влаги справедливы в определенных границах и имеют ряд допущений, которые лишь приближенно учитывают микро- или макроструктуру древесины, и в основе которых лежит допущение об «элементарной ячейке» трахеиды [Гостеев и др., 2003; Зарипов, Корниенко, 2021; Гороховский и др., 2022; Eitelberger, Hofstetter, 2011]. Подобное допущение не обеспечивает определение необходимой точности коэффициента влагопроводности, достаточной для проведения технологических процессов обезвоживания или увлажнения древесины. Несколько большей точностью определения коэффициента влагопроводности древесины являются методы рентгеноскопии, основанные на определении послойной влажности в древесине [Сапожников и др., 2016]. Косвенные методы определения влагопроводности древесины имеют ограничения, что существенно ограничивает их применение на практике. Исследование тока влаги вдоль волокон древесины важно при разработке и обосновании режимов сушки [Гостеев и др., 2003; Рудак, Снопков, 2010].

Представленные в литературных источниках модели не позволяют с заданной точностью описывать процессы влагопереноса в древесине. В основу этих моделей положено допущение об упрощенном строении древесины различных древесных пород. Ни одна из моделей не учитывает биологическую изменчивость структуры анатомических элементов, их размеров, наличие пороков, положение в стволе дерева и другие факторы, оказывающие влияние на перемещение диффузной влаги в древесине. Поэтому в

настоящее время задача моделирования процесса тока влаги в древесине, даже для отдельной группы пород, представляется крайне сложной.

Наиболее простым и точным решением задачи определения величины коэффициента влагопроводности древесины является экспериментальный метод стационарного тока влаги.

Цель и задачи исследования. Целью настоящего исследования является экспериментальное определение величины коэффициента влагопроводности ядровой древесины сосны с учетом местоположения по высоте ствола дерева.

Материалы и методы исследования. Исследование коэффициента влагопроводности выполняли на древесине сосны обыкновенной (*Pinus sylvestris* L.), произрастающей на территории учебно-опытного лесхоза Воронежского государственного лесотехнического университета им. Г.Ф. Морозова (УОЛ ВГЛТУ) в Воронежской области. Для исследования были выбраны деревья одной возрастной группы.

Предмет исследования составил коэффициент влагопроводности образцов из древесины *P. sylvestris* в тангенциальном и радиальном направлениях по высоте ствола.

Из свежесрубленной древесины ствола были выпилены диски толщиной 40 мм на высоте 0,5 м, 9 м и 18 м. Затем из каждого диска на расстоянии $0,5R$ были выпилены по 16 образцов размером $30 \times 30 \times 30$ мм для определения тока влаги в радиальном и тангенциальном направлениях. Схема выпилки образцов на поперечном срезе ствола представлена на рис. 1. После этого все образцы были высушены до абсолютно сухого состояния.

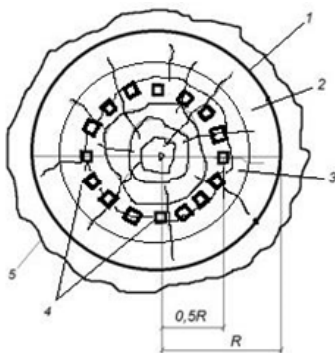


Рис. 1. Схема выпилки образцов:

1 – места отбора образцов; 2 – заболонь; 3 – ядро; 4 – кора

Fig. 1. Sample sawing scheme:

1 – sampling sites; 2 – sapwood; 3 – core; 4 – bark

Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в радиальном и тангенциальном направлениях на различной высоте ствола был определен методом стационарного тока влаги по методике, предложенной В.Н. Арциховской [1957].

Боковые стенки каждого из образцов изолировали от контакта с окружающей средой (рис. 2). Это обеспечивало ток влаги в образцах в заданном направлении. После этого каждый образец закрепляли в стеклянном стакане на крышке из тонкой жести. Все зазоры были обработаны герметиком. Часть стакана была заполнена дистиллированной водой. Интенсивность тока влаги в образце зависит от величины постоянного давления водяного пара у нижней части образца. Это было достигнуто за счет установки на дно стакана треноги из медной проволоки сечением 0,8 мм, обернутой в четыре слоя марли, и позволило поддерживать постоянное расстояние между его нижней частью и уровнем поверхности марли. Затем стаканы с образцами помещали в эксикаторы. Для обеспечения влажности воздуха, близкой к абсолютно сухому состоянию, в эксикаторы была налита серная кислота, которая поглощала пары влаги. Эксикаторы с образцами были помещены в шкафы при температуре 20 и 60 °С.

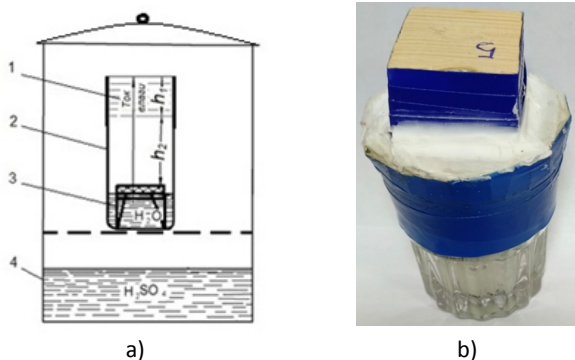


Рис. 2. Схема установки (а) и внешний вид стакана с образцом древесины (б):

1 – образец древесины; 2 – стакан; 3 – тренога; 4 – серная кислота

Fig. 2. Installation diagram (a) and appearance of a glass with a sample of wood (b):

1 – a sample of wood; 2 – a glass; 3 – a tripod; 4 – sulfuric acid

В результате разности парциальных давлений пара над образцом древесины и под ним происходит движение влаги. Каждые двое суток производили взвешивание образцов вместе со стаканами и определяли убыль массы. Прошедшую через образцы влагу поглощала серная кислота. По

мере поглощения влаги в эксикаторы добавляли серную кислоту для поддержания необходимой её концентрации. После установления постоянной убыли влаги через образцы их извлекали из стаканов и раскалывали на тонкие пластины толщиной 2–3 мм. Толщину каждой пластины измеряли в её средней части штангенциркулем. Суммарную разницу толщины всех пластин и первоначального размера образца равномерно распределяли между всеми пластинами. Затем каждую пластину взвешивали и определяли влажность весовым методом. Градиент влажности du/dx в образцах определяли графическим методом.

Численные значения коэффициента влагопроводности $D \cdot 10^{-10}$, м²/с определяли по формуле:

$$D = \frac{M}{F \cdot \rho_o \frac{du}{dx}}, \quad (1)$$

где M – количество влаги, прошедшей через древесину за 1 с, кг; F – площадь поверхности образца, перпендикулярная к направлению тока влаги, м²; ρ_o – плотность древесины в абсолютно сухом состоянии, кг/м³; du/dx – градиент влажности, м⁻¹.

Результаты исследований. На рис. 3–6 представлены экспериментальные значения величины коэффициента влагопроводности ядровой древесины сосны в радиальном и тангенциальном направлениях тока влаги по высоте ствола в зависимости от её влажности.

Величина коэффициента влагопроводности в радиальном направлении у древесины сосны по высоте ствола при температуре 20 °С изменяется достаточно существенно. В комлевой части ствола коэффициент влагопроводности древесины изменяется в интервале $2,9\text{--}3,4 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Понижение влажности древесины до 17% не оказывает существенного влияния на коэффициент влагопроводности, его величина составляет около $3,4 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Повышение влажности древесины выше 17% приводит к снижению величины коэффициента влагопроводности до $2,9 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Понижение влажности древесины в средней части ствола до 10% не оказывает существенного влияния на величину коэффициента влагопроводности, величина которого составляет в среднем $5,7 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а при повышении влажности выше 10% она постепенно снижается до $3,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с. В вершинной части ствола изменение величины коэффициента влагопроводности носит аналогичный характер. Так, при влажности древесины менее 10% коэффициент влагопроводности изменяется незначительно в пределах $6,2 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а при её повышении он монотонно понижается до $4,2 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

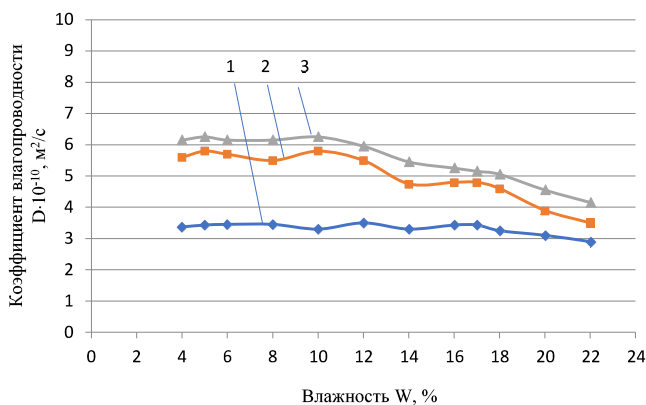


Рис. 3. Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в радиальном направлении по высоте ствола в зависимости от влажности при температуре 20 °С:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола;
3 – вершинная часть ствола

Fig. 3. Coefficient of moisture conductivity of pine core wood in the radial direction along the trunk height depending on humidity at a temperature of 20 °C:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk;
3 – the apex part of the trunk

В тангенциальном направлении величина коэффициента влагопроводности у древесины сосны при температуре 20 °С и изменении влажности варьируется больше, чем в радиальном направлении. Так, в комлевой части ствола относительная стабильность тока влаги отмечена при влажности менее 10%, и коэффициент влагопроводности составляет в среднем $4,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. При увеличении влажности древесины интенсивность тока влаги постепенно убывает до величины $2,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. В средней части ствола отмечена стабилизация тока влаги около $4,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ при влажности древесины менее 16%. Повышение влажности древесины выше 16% приводит к понижению коэффициента влагопроводности до $3,2 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. В вершинной части ствола при влажности древесины менее 18% отмечается стабилизация тока влаги. Величина коэффициента влагопроводности составляет около $6,6 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Повышение влажности древесины выше 18% приводит к понижению интенсивности тока влаги, и величина коэффициента влагопроводности понижается до $4,3 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$.

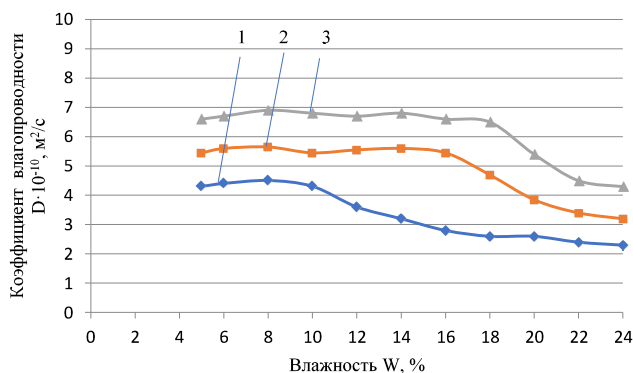


Рис. 4. Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в тангенциальном направлении по высоте ствола в зависимости от влажности при температуре 20 °С:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола;
3 – вершинная часть ствола

Fig. 4. Moisture conductivity coefficient of pine core wood in the tangential direction along the trunk height depending on humidity at a temperature of 20 °C:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk;
3 – the apex part of the trunk

Интенсивность тока влаги в радиальном направлении больше, чем в тангенциальном, в древесине из комлевой части ствола в среднем на 14%, из средней части ствола – на 5%, а из вершинной – на 16%. Можно отметить, что независимо от направления тока влаги при температуре 20 °С величина коэффициента влагопроводности древесины сосны увеличивается по высоте ствола и в средней части ствола в 1,5 раза, а в вершинной – в 2,1 раза по сравнению с комлевой.

Коэффициент влагопроводности у древесины сосны в радиальном направлении при температуре 60 °С в комлевой части ствола в среднем составляет $9,8 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. С уменьшением влажности древесины с 22% до 2,5% коэффициент влагопроводности повышается с $5,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$ до $13,5 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. Незначительное снижение величины влагопроводности древесины отмечено при влажности древесины около 8%.

В средней части ствола величина коэффициента влагопроводности составляет $14,9 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$, а в вершинной – $20,0 \cdot 10^{-10} \text{ м}^2/\text{с}$. При понижении влажности древесины с 22 до 2% интенсивность тока влаги в древесине из

средней части ствола возрастает с $8 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $18,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а в вершинной – с $13 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $24 \cdot 10^{-10}$ м²/с. Относительная стабилизация тока влаги отмечена у древесины из средней и вершинной частей ствола в интервале влажности 12–16%, а также при влажности менее 8% в комлевой части ствола.

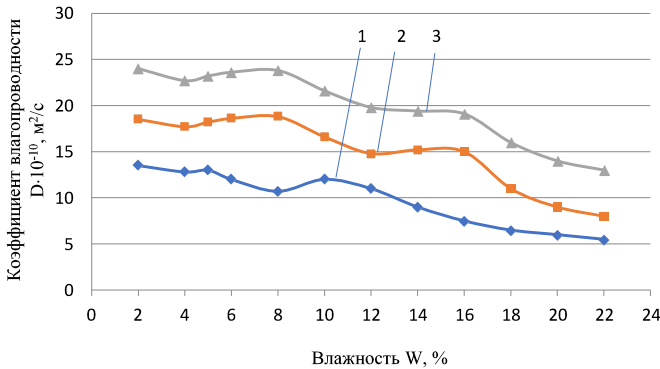


Рис. 5. Коэффициент влажностепроводности ядровой древесины сосны в радиальном направлении по высоте ствола в зависимости от влажности при температуре 60 °С:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола;
3 – вершинная часть ствола

Fig. 5. Coefficient of moisture conductivity of pine core wood in the radial direction along the trunk height depending on humidity at a temperature of 60 °C:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk;
3 – the apex part of the trunk

В тангенциальном направлении коэффициент влажностепроводности древесины сосны из комлевой части ствола при температуре 60 °С в среднем составляет $7,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с, в средней – $13,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а в вершинной – $16,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с. С уменьшением влажности древесины с 22% до 2% коэффициент влажностепроводности в комлевой части ствола возрастает с $3,5 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $11,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с, в средней – с $9,2 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $17,0 \cdot 10^{-10}$ м²/с, а в вершинной – с $12,4 \cdot 10^{-10}$ м²/с до $20,2 \cdot 10^{-10}$ м²/с.

Интенсивность тока влаги при температуре 60 °С в радиальном направлении больше, чем в тангенциальном, в древесине из комлевой части ствола в среднем на 14,0%, из средней части ствола – на 5,0%, а из

вершинной – на 16,0%, что соответствует значениям тока влаги при температуре 20 °С. Можно отметить, что при температуре 20 и 60 °С независимо от направления тока влаги закономерности изменения коэффициента влагопроводности в древесине сосны по высоте ствола идентичны. Действие температуры на интенсивность тока влаги в радиальном направлении и тангенциальном направлении различно. Так, при повышении температуры с 20 до 60 °С возрастает интенсивность тока влаги в древесине в радиальном направлении в среднем в 2,8 раза, а в тангенциальном – в 2,5 раза.

Практическое значение имеет средняя величина коэффициента влагопроводности по высоте ствола. Экспериментально установлено повышение тока влаги в древесине по высоте ствола. Среднее значение коэффициента влагопроводности в радиальном и тангенциальном направлении повышается в средней части ствола в 1,6 раза, а в вершинной – в 2,05 раза по сравнению с комлевой частью ствола.

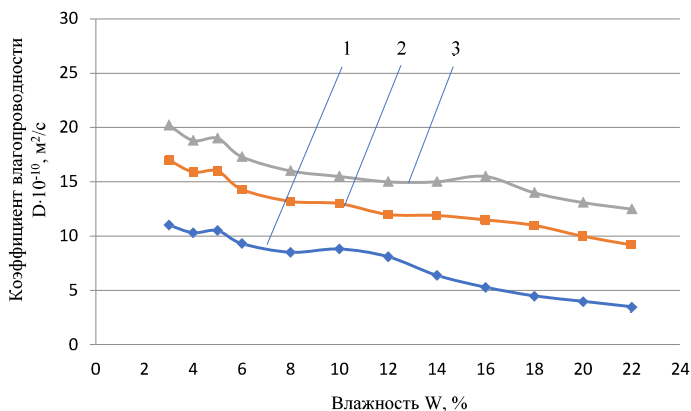


Рис. 6. Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в тангенциальном направлении по высоте ствола в зависимости от влажности при температуре 60 °С:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола;
3 – вершинная часть ствола

Fig. 6. Moisture conductivity coefficient of pine core wood in the tangential direction along the trunk height depending on humidity at a temperature of 60 °C:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk;
3 – the apex part of the trunk

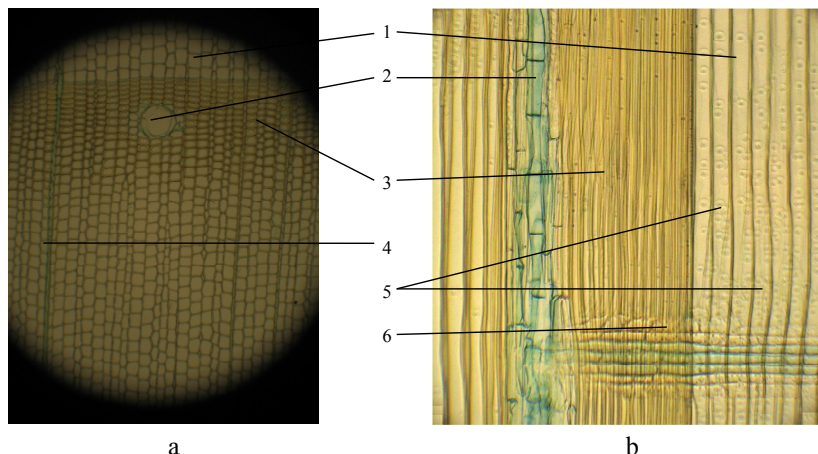


Рис. 7. Поперечный срез (а) и радиальный срез (б) древесины сосны:

- 1 – ранняя древесина; 2 – смоляной ход; 3 – поздняя древесина;
4 – сердцевинный луч; 5 – окаймленная пора; 6 – лучевая трахеида

Fig. 7. Cross section (a) and radial section (b) of pine wood:

- 1 – early wood; 2 – resin stroke; 3 – late wood; 4 – core beam; 5 – bordered pit;
6 – radial trachea

Для инженерных расчетов значения коэффициента влагопроводности древесины сосны в зависимости от температуры представлены в виде графиков на рис. 8.

Обсуждение. Анализ результатов исследования влагопроводности древесины сосны при температуре 20 °С показывает, что интенсивность тока влаги в радиальном направлении в комлевой части ствола практически не зависит от влажности древесины. Уменьшение количества диффузной влаги в древесине приводит к увеличению интенсивности её тока. Понижение влажности древесины до 10–12% и менее приводит к увеличению тока влаги в средней и вершинной частях ствола более чем в два раза по сравнению с комлевой частью ствола. С уменьшением влажности древесины в комлевой части ствола ток влаги в тангенциальном направлении возрастает примерно в два раза, достигая некоторой стабилизации при влажности 10% и менее. В средней и вершинной частях ствола он достигает наибольшей величины при влажности древесины менее 16–18%.

Различие в интенсивности тока влаги в древесине в радиальном и тангенциальном направлениях обусловлено строением анатомических элементов. Большее движение влаги в радиальном направлении обусловлено

наличием сердцевинных лучей и лучевых трахеид (рис. 7). Их равномерное распределение в стволе дерева способствует более равномерному току влаги в данном направлении.

В тангенциальном направлении перемещение влаги происходит в основном через окаймленные поры. Перемещение влаги через эти поры часто осложняется смещением торусов и перекрытием каналов пор. В нижней части ствола количество окаймленных пор со смещенным торусом выше. С увеличением высоты ствола количество пор со смещенным торусом несколько снижается. Это приводит к стабилизации тока влаги в тангенциальном направлении (рис. 4, поз. 2 и 3).

Большое влияние на влагопроводность древесины оказывает её плотность. В комлевой части ствола плотность древесины наибольшая. С увеличением высоты ствола происходит уменьшение плотности древесины и, как следствие этого, увеличение её пористости. Снижение плотности оказывает определяющее влияние на увеличение интенсивности тока влаги в древесине при невысокой температуре.

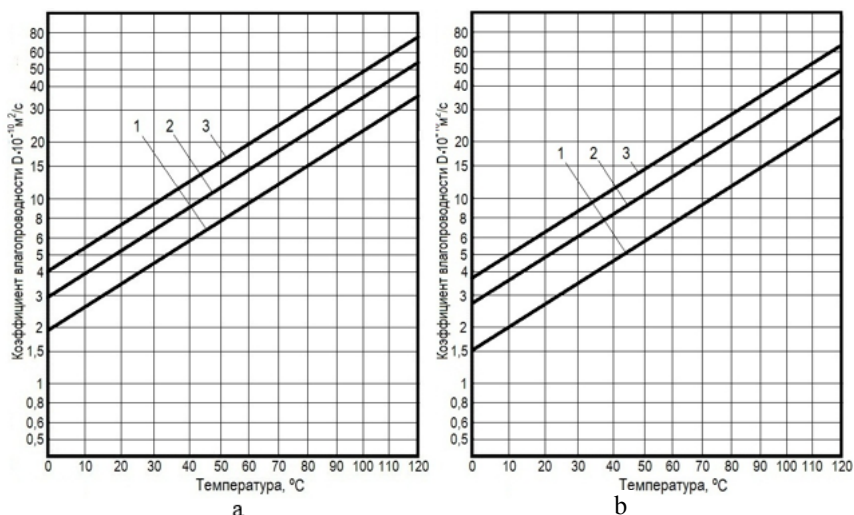


Рис. 8. Коэффициент влагопроводности ядровой древесины сосны в радиальном (а) и тангенциальном (б) направлениях по высоте ствола:

1 – комлевая часть ствола; 2 – средняя часть ствола; 3 – вершинная часть ствола

Fig. 8. The coefficient of moisture conductivity of pine core wood in the radial (a) and tangential (b) directions along the trunk height:

1 – the butt part of the trunk; 2 – the middle part of the trunk; 3 – the apex part of the trunk

Характер изменения коэффициента влагопроводности древесины из различных частей ствола дерева следует учитывать при атмосферной сушке. Интенсивность тока влаги в древесине сосны в радиальном направлении при температуре 20 °С в комлевой части ствола изменяется незначительно при изменении влажности древесины по сравнению с током влаги в средней и вершинной частях ствола. Величина коэффициента влагопроводности у древесины сосны в тангенциальном направлении меньше, чем в радиальном, примерно на 12%. Интенсивность атмосферной сушки пиломатериалов из комлевой части ствола будет меньше, чем из средней и вершинной частей ствола при прочих равных условиях, примерно в 1,5 раза. Представляется целесообразным при атмосферной сушке древесины до влажности менее 18% лесоматериалы из средней и вершинной частей ствола размещать в отдельные штабеля и поддерживать более высокую интенсивность испарения влаги. При атмосферной сушке также возможна укладка пиломатериалов в виде досок из комлевой части ствола в отдельные штабеля.

Наиболее эффективной предварительная сортировка пиломатериалов перед атмосферной сушкой будет в регионах, относящихся к четвертой климатической зоне. В данных регионах теплый период года превышает холодный, а средняя годовая температура достаточно высокая. Это обеспечивает относительно быстрое удаление влаги из древесины. По сравнению с другими климатическими зонами процесс высушивания древесины до влажности 10% является экономически выгодным.

Повышение температуры с 20 до 60 °С вызывает увеличение тока влаги в древесине примерно в два раза по всей высоте ствола. В связи с этим представляется также целесообразным осуществлять предварительную отсортировку пиломатериалов и укладку их в отдельные штабеля. Это позволит более эффективно использовать работу сушильных камер и повысить их производительность в 1,5–2,0 раза.

Большое практическое значение имеет возможность интенсификации процесса камерой сушки. Анализ величины коэффициента влагопроводности древесины показывает, что для сушки древесины сосны наиболее приемлемы многоступенчатые режимы сушки. Рекомендуемые РТМ режимы третьей ступени от начальной влажности древесины 25% не являются рациональными. Представляется целесообразными разбить третью ступень на участки с влажностью древесины 25–15%, 15–10% и менее 10%.

При повышении температуры увеличивается разница интенсивности тока влаги в радиальном направлении по сравнению с тангенциальным.

При сушке брусков или брусьев это позволит сократить продолжительность процесса сушки несколько больше, чем при сушке пиломатериалов в виде досок.

Выводы. Плотность древесины сосны понижается по высоте ствола, в связи с чем изменяется интенсивность тока влаги.

У древесины сосны интенсивность тока влаги в стволе в радиальном направлении выше, чем в тангенциальном, из комлевой части ствола в среднем на 14,0%, из средней части ствола – на 5,0%, а из вершинной – на 16,0% независимо от температуры среды.

Интенсивность тока влаги в древесине при повышении температуры с 20 до 60 °С возрастает в радиальном направлении в 2,8 раза, а в тангенциальном – в 2,5 раза.

По высоте ствола возрастает величина коэффициента влагопроводности древесины в средней части ствола в 1,6 раза, а в вершинной – в 2,05 раза по сравнению с комлевой.

Закономерности изменения величины коэффициента влагопроводности в зависимости от влажности древесины позволяют скорректировать существующие режимы атмосферной и камерной сушки, повысить скорость тока влаги и уменьшить величину остаточных напряжений в древесине.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Алпаткина Р.П. О влагопроводности древесины важнейших отечественных пород // Деревообр. пром-сть. 1967. № 9. С. 12–14.

Арциховская Н.В. Исследование влагопроводности древесины // Труды института леса. 1957. Т. 9: Вопросы древесиноведения. С. 127–157.

Гороховский А.Г., Шишкина Е.Е., Агафонов А.С. Конвективная сушка пиломатериалов на основе управляемого влагообмена // ИВУЗ. Лесной журнал. 2022. № 1(385). С. 166–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172.

Гостеев Ю.А., Коробейников Ю.Г., Федоров А.В., Фомин В.М. Экспериментальное определение влагопроводности образцов из сосны в продольном направлении при конвективной сушке // Прикладная механика и техническая физика. 2003. Т. 44. № 3. С. 117–123.

Зарипов Ш.Г., Корниенко В.А. О влагообменных процессах при конвективной сушке в камерах периодического действия лиственных пиломатериалов // Хвойные бореальной зоны. 2021. Т. 39. № 1. С. 60–65.

Михайлова Ю.С., Платонов А.Д., Снегирева С.Н., Киселева А.В., Мозговой Н.В. Определение минимальной высоты источника выбросов из камеры при сушке древесины бука // Лесотехнический журнал. 2020. Т. 9. №4 (36). С. 117–125.

Платонов А.Д., Волошин С.И., Снегирева С.Н., Киселева А.В., Мозговой Н.В., Сафонов А.О. Влагодпроводность древесины яблони // Лесотехнический журнал. 2019. Т. 8. №4 (32). С. 181–187.

Платонов А.Д., Снегирева С.Н., Кантиева Е.В., Бондаренко В.С., Киселева А.В. Влагодпроводность древесины сосны, поврежденной пожаром, при атмосферной сушке // Перспективные ресурсосберегающие технологии развития лесопромышленного комплекса: матер. межд. науч.-практ. конф. мол. уч. и студ. Воронеж, 2023а. С. 126–129. DOI: 10.58168/R-STDTIC2023_126-129.

Платонов А.Д., Снегирева С.Н., Кантиева Е.В., Киселева А.В. Влагодпроводность ядровой древесины сосны, поврежденной сильным низовым и беглым верховым пожаром // Лесотехнический журнал. 2023б. Т. 13. № 4 (52). Ч. 1. С. 191–208. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12.

Рудак А.Г., Снопков Б.В. Исследование влагодпроводности древесины сосны в различных структурных направлениях // Труды БГТУ. № 2. Лесная и деревообрабатывающая промышленность. 2010. № 2. С. 180–183.

Сапожников И.В., Скуратов Н.В., Алексеева И.И., Самойленко Д.А., Мамонтов М.П., Матвеева К.А. Определение коэффициента влагодпроводности при низкотемпературной сушке древесины // Лесной вестник. Forestry Bulletin. 2016. № 4. С. 34–39.

Серговский П.С. Расчет процессов высыхания и увлажнения древесины. М.: Гослесбумиздат, 1952. 75 с.

Скуратов Н.В., Усов Д.В., Сергеев И.Г. Паропроницаемость и влагодпроводность термически модифицированной древесины ясеня // Ежегодная нац. науч.-тех. конф. проф.-преп. состава, асп. и студ. Мытищинского филиала МГТУ им. Н.Э. Баумана по результатам НИР за 2021 г. Красноярск, 2022. С. 113–115.

Сотникова М.А., Соколова В.А. Разработка методов и процессов обезвоживания древесины и древесных отходов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: матер. XVII Междунар. науч.-технич. конф. Вологда: ВоГУ, 2019. С. 178–181.

Afshari Z., Malek S. Moisture Transport in Laminated Wood and Bamboo Composites Bonded with Thin Adhesive Layers – a Numerical Study // SSRN Electronic Journal. 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4026076.

Chiniforush A.A., Valipour H., Akbarnezhad A.A. Water vapor diffusivity of engineered wood: Effect of temperature and moisture content // Construction and Building Materials. 2019. Vol. 224. P. 1040–1055.

Eitelberger J., Hofstetter K. Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation. Part II: Steady state moisture diffusion coefficient // Composites Science and Technology. 2011. Vol. 71, iss. 2. P. 145–151.

Hofstetter A. K., Eitelberger J. Comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point: Physical background, implementa-

tion and experimental validation // *International Journal of Thermal Sciences*. 2011. Vol. 50, iss. 10. P. 1861–1866.

Platonov A.D., Snegireva S.N., Drapalyuk M. V., Novikov A.I., Kantieva E.V., Novikova T.P. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia // *Forests*. 2022. Vol. 13 (11), no. 1758. DOI: 10.3390/f13111758.

Snegireva S.N., Platonov A.D., Kiseleva A.V., Kantieva E.V. Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire // *Forestry Engineering Journal*. 2022. Vol. 11, no. 4. P. 79–87. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.

Tyukavina O., Gudina A. Heating capability of postpyrogen pine wood // *Forestry Engineering Journal*. 2020. Vol. 10, no. 2. P. 188–195. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19.

Zhan T., Sun F., Lyu C., He Q., Xu K., Zhang Ya., Cai L., Huang Zh., Lyu J. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: Longitudinal and radial variations // *Construction and Building Materials*. 2020. Vol. 259, no. 119641. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119641.

References

Afshari Z., Malek S. Moisture Transport in Laminated Wood and Bamboo Composites Bonded with Thin Adhesive Layers – a Numerical Study. *SSRN Electronic Journal*, 2022. DOI: 10.2139/ssrn.4026076.

Alpatkina R.P. About moisture conductivity of the most important native tree species wood. *Woodworking industry*, 1967, no. 9, pp. 12–14. (In Russ.)

Artsikhovskaya N.V. Investigation of wood moisture conductivity. *Proceedings of Institute of Forest*, 1957, T. 9: Questions of wood science, pp. 127–157. (In Russ.)

Chiniforush A.A., Valipour H., Akbarnezhad A.A. Water vapor diffusivity of engineered wood: Effect of temperature and moisture content. *Construction and Building Materials*, 2019, vol. 224, pp. 1040–1055.

Eitelberger J., Hofstetter K. Prediction of transport properties of wood below the fiber saturation point – A multiscale homogenization approach and its experimental validation. Part II: Steady state moisture diffusion coefficient. *Composites Science and Technology*, 2011, vol. 71, iss. 2, pp. 145–151.

Gorokhovskiy A.G., Shishkina E.E., Agafonov A.S. Convective drying of lumber based on controlled moisture exchange. *IVUZ. Forest Journal*, 2022, no. 1(385), pp. 166–172. DOI: 10.37482/0536-1036-2022-1-166-172. (In Russ.)

Gosteev Yu.A., Korobeynikov Yu.G., Fedorov A.V., Fomin V. M. Experimental determination of moisture conductivity of pine samples in the longitudinal direction during convective drying. *Applied Mechanics and technical physics*, 2003, vol. 44, no. 3, pp. 117–123. (In Russ.)

Hofstetter A.K., Eitelberger J. Comprehensive model for transient moisture transport in wood below the fiber saturation point: Physical background, implementation and experimental validation. *International Journal of Thermal Sciences*, 2011, vol. 50, iss. 10, pp. 1861–1866.

Mikhailova Yu.S., Platonov A.D., Snegireva S.N., Kiseleva A.V., Mozgovoy N.V. Determination of the minimum height of the emission source from the chamber during drying of beech wood. *Forestry Engineering Journal*, 2019, T. 9, no. 4(36), pp. 117–125. (In Russ.)

Platonov A.D., Voloshin S., Snegireva S.N., Kiseleva A.V., Mozgovoy N., Safonov A.O. Moisture conductivity of apple wood. *Forestry Engineering Journal*, 2018, vol. 8, no. 4(32), pp. 181–187. (In Russ.)

Platonov A.D., Snegireva S.N., Drapalyuk M. V., Novikov A.I., Kantieva E.V., Novikova T.P. Wood Quality along the Trunk Height of Birch and Aspen Growing in the Restoring Forests of Central Russia. *Forests*, 2022, vol. 13 (11), no. 1758. DOI: <https://doi.org/10.3390/f13111758>.

Platonov A.D., Snegireva S. N., Kantieva E. V., Bondarenko V.S., Kiseleva A.V. Moisture conductivity of pine wood damaged by fire during atmospheric drying. *Promising resource-saving technologies for the development of the timber industry complex: materials of Int. sci.-pract. conf. of young scientists and students*. Voronezh, 2023a, pp. 126–129. DOI: 10.58168/R-STDTIC2023_126-129. (In Russ.)

Platonov A.D., Snegireva S.N., Kantieva E.V., Kiseleva A.V. Heartwood moisture conductivity of standing pine damaged by running crown and strong surface wildfire. *Forestry Engineering Journal*, 2023b, vol. 13, no. 4 (52), p. 1, pp. 191–208. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2023.4/12. (In Russ.)

Rudak A.G., Snopkov B.V. Investigation of moisture conductivity of pine wood in various structural directions. *Proceedings of BSTU. Series 2. Forestry and woodworking industry*, 2010, no. 2, pp. 180–183. (In Russ.)

Sapozhnikov I.V., Skuratov N.V., Alekseeva I.I., Samoylenko D.A., Mamontov M.P., Matveeva K.A. Determination of the coefficient of moisture conductivity during low-temperature drying of wood. *Lesnoy vestnik. Forestry Bulletin*, 2016, no. 4, pp. 34–39. (In Russ.)

Sergovskiy P.S. Calculation of wood dessication and humidification processes. M.: State Publishing House of Forest and Paper Industry, 1952. 75 p. (In Russ.)

Skuratov N.V., Usov D.V., Sergeev I.G. Vapor permeability and moisture conductivity of thermally modified ash wood. *Annual nat. sci-tech. conf. for Professors, Lecturers, Postgraduate Students and Students of Mytitschi branch of MSTU named after N.E. Bauman based on results of R&D in 2021*. Krasnoyarsk, 2022, pp. 113–115. (In Russ.)

Snegireva S.N., Platonov A.D., Kiseleva A.V., Kantieva E. V. Variability of the hardness of pine wood damaged by strong grassroots and rampant riding fire. *Forestry Engineering Journal*, 2022, vol. 11, no. 4., pp. 79–87. DOI: 10.34220/issn.2222-7962/2021.4/7.

Sotnikova M.A., Sokolova A.V. Development of methods and processes for dewatering wood and wood waste. *Actual problems of the development of the forest complex: mater. of XVII int. sci.-tech. conf. Vologda: VoSU, 2019, pp. 178–181. (In Russ.)*

Tyukavina O., Gudina A., Heating capability of postpyrolysis-pine wood. *Forestry Engineering Journal*, 2020, vol. 10, no. 2, pp. 188–195. DOI: <https://doi.org/10.34220/issn.2222-7962/2020.2/19>.

Zaripov Sh.G., Kormienko V.A. On moisture exchange processes during convective drying in batch chambers of larch lumber. *Coniferous boreal zones*, 2021, vol. 39, no. 1, pp. 60–65. (In Russ.)

Zhan T., Sun F., Lyu C., He Q., Xu K., Zhang Ya., Cai L., Huang Zh., Lyu J. Moisture diffusion properties of graded hierarchical structure of bamboo: Longitudinal and radial variations. *Construction and Building Materials*, 2020, vol. 259, no. 119641. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.119641.

Материал поступил в редакцию 28.07.2024

Кантиева Е.В., Снегирева С.Н., Платонов А.Д. Влагодупроводность ядровой древесины сосны в стволе дерева // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 350–368. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.350-368

В статье рассмотрен процесс перемещения влаги в древесине в процессе её гидротермической обработки. Получение качественно высушенного материала с минимальными внутренними напряжениями возможно на основе сведений о величине тока влаги в древесине, выражаемой через коэффициент влагодупроводности. На коэффициент влагодупроводности большое влияние оказывает температура, с повышением которой его величина существенно возрастает. На интенсивность тока влаги в древесине оказывают влияние порода, направление тока влаги и место расположения древесины в стволе дерева. Имеющиеся сведения о влагодупроводности древесины не учитывают изменчивость плотности древесины по высоте ствола дерева и представлены для комлевой части ствола. Определение коэффициента влагодупроводности установлено в радиальном и тангенциальном направлении для ядровой древесины сосны с учетом высоты ствола методом стационарного тока влаги. Экспериментально установлено повышение величины коэффициента влагодупроводности древесины сосны по высоте ствола в средней его части в 1,6 раза, а в вершинной – в 2,05 раза по сравнению с комлевой. Интенсивность тока влаги в радиальном направлении выше, чем в тангенциальном, в древесине из комлевой части ствола в среднем на 14,0%, из средней части ствола – на 5,0%, а из вершинной – на 16,0% независимо от температуры среды. Полученные

закономерности об изменчивости коэффициента влагопроводности древесины сосны по высоте ствола показывают целесообразность проведения предварительной сортировки древесины перед гидротермической обработкой с учетом местоположения её в стволе дерева. Это позволит оптимизировать процессы высыхания и увлажнения древесины, обосновать рациональные режимы камерной и атмосферной сушки.

Ключевые слова: коэффициент влагопроводности, влажность древесины, древесина сосны, плотность древесины, древесина ядровая, метод стационарного тока влаги, диффузный ток влаги, ствол дерева, высота ствола.

Kantieva E.V., Snegireva S.N., Platonov A.D. Moisture conductivity of pine core wood in a tree trunk. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 350–368 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.350-368

The article considers the process of moisture transfer in wood during its hydrothermal treatment. Obtaining a high-quality dried material with minimal internal stresses is possible based on information about the amount of moisture current in the wood, expressed in terms of the moisture conductivity coefficient. The coefficient of moisture conductivity is greatly influenced by temperature, with an increase in which its value increases significantly. The intensity of the moisture current in the wood is influenced by the breed, the direction of the moisture current and the location of the wood in the tree trunk. The available information on the moisture conductivity of wood does not take into account the variability of the density of wood in the height of the tree trunk and is presented for the butt part of the trunk. The determination of the moisture conductivity coefficient was established in the radial and tangential directions for sound pine wood, taking into account the height of the trunk by the method of stationary moisture current. Experimentally, an increase in the value of the moisture conductivity coefficient of pine wood in the height of the trunk in its middle part by 1.6 times, and in the apex – by 2.05 times compared with the lump. The intensity of the moisture current in the radial direction is higher than in the tangential direction in wood from the butt part of the trunk by an average of 14.0%, from the middle part of the trunk – by 5.0%, and from the apex – by 16.0% regardless of the ambient temperature. The obtained patterns on the variability of the moisture conductivity coefficient of pine wood in trunk height show the expediency of carrying out preliminary sorting of wood before hydrothermal treatment, taking into account its location in the trunk of the tree. This will optimize the processes of drying and moistening of wood, justify rational modes of chamber and atmospheric drying.

Keywords: moisture conductivity coefficient, wood moisture, pine wood, wood density, sound wood, stationary moisture current method, diffuse moisture current, tree trunk, trunk height.

КАНТИЕВА Екатерина Валентиновна – заведующая кафедрой механической технологии древесины Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат технических наук. ResearcherID: AAR-8571-2020. ORCID: 0000-0001-8352-1941.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: ekantieva@mail.ru

KANTIEVA Ekaterina V. – PhD (Technical), Head of the Department of Production, Mechanical Wood Technology, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov. Researcher ID: AAR-8571-2020. ORCID: 0000-0001-8352-1941.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: ekantieva@mail.ru

СНЕГИРЕВА Светлана Николаевна – доцент кафедры древесиноведения Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, кандидат биологических наук. ResearcherID: AAR-5877-2020. ORCID: 0000-0003-4371-2270.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: svetka-sneg@yandex.ru

SNEGIREVA Svetlana N. – PhD (Biological), Associate Professor of the Department of Wood Science, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov. Researcher ID: AAR-5877-2020. ORCID: 0000-0003-4371-2270.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: svetka-sneg@yandex.ru

ПЛАТОНОВ Алексей Дмитриевич – заведующий кафедрой древесиноведения Воронежского государственного лесотехнического университета имени Г.Ф. Морозова, доктор технических наук. ResearcherID: AAC-9820-2019. ORCID: 0000-0001-5941-6287.

394087, ул. Тимирязева, д. 8, г. Воронеж, Россия. E-mail: aleksey66@yandex.ru

PLATONOV Aleksei D. – DSc (Technical), Head of the Department of WoodScience, Voronezh State Forestry Engineering University named after G.F. Morozov. Researcher ID: AAC-9820-2019. ORCID: 0000-0001-5941-6287.

394087. Timiryazev str. 8. Voronezh. Russia. E-mail: aleksey66@yandex.ru

4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

УДК 674-419.3

А.А. Леонович, Л.В. Замазий

ПОДСОЛНЕЧНАЯ ЛУЗГА КАК СЫРЬЁ ДЛЯ ПЛИТ ТИПА ДСП

Введение. Подсолнечник является одной из самых распространённых и высокоурожайных масличных культур в Российской Федерации [Ториков, Мельникова, 2024]. Плод подсолнечника – удлинённая клиновидная семянка, размеры которой колеблются, состоящая из двух основных частей кожуры (плодовой оболочки), выполняющей роль защиты семени от негативного воздействия окружающей среды и насекомых, внутри которой заключено белое ядро. В 2023 г. по данным Российской селекционно-семеноводческой компании сбор семян подсолнечника на территории нашей страны составил 56 800 тыс. т.

В результате переработки семян при отделении ядра от плодовой оболочки (облущивании) образуется побочный продукт. Технически этот отход называют лузгой, она представляет собой одревесневшую растительную ткань. Доля лузги составляет 15...20% от общей массы плода. В годовом исчислении на масложировых предприятиях скапливается порядка 8–9 млн т лузги, которые требуют дальнейшей утилизации.

В основном лузга используется как топливо для обогрева помещений или свозится в отвалы. Рассматривались и другие варианты ее использования для изготовления топливных пеллет, как дополнительное кормовое средство для скота, в получении фурфурола и кормовых дрожжей [Ваншин, 2015; Гнеуш и др., 2020], но практического применения они не нашли.

Одним из рациональных путей использования лузги представляется включение ее в состав строительных материалов. В частности, на её основе может быть изготовлен композиционный плитный материал по типу древесностружечной плиты (ДСП) с физико-механическими свойствами, присущими как минимум их низким маркам. Это откроет новые перспективы и возможности их применения в различных отраслях промышленности, главным образом в строительстве, особенно для южных безлесных районов нашей страны.

Сведения о лузге как сырье для плитного материала весьма ограничены [Угрюмов, 2001; Плотникова, 2021]. Прямой заменой древесных частиц положительных результатов из-за их исходной формы, напоминающей лодочки и потому плохо прилегающей друг к другу, достигнуто не было. Для успешного включения лузги в плитное производство нужно выявить необходимые для этого не только геометрические, но и физико-химические свойства и соответствующим образом её модифицировать.

Целью настоящей статьи явилась выработка концепции трансформации лузги в подходящее сырьё и изучение получаемого модифицированием субстрата для дальнейшей разработки технологии изготовления плит на этой основе.

Концепция создания на основе подсолнечной лузги плитного материала типа ДСП состоит в геометрической трансформации субстрата для создания достаточной поверхности контакта частиц между собой и модифицирования их поверхности для обеспечения адгезионного взаимодействия со связующим, при этом желательно дополнить условиями взаимодействия его реакционноспособных групп с другими добавками, которые вводятся в субстрат с пластифицирующей функцией. Для размягчения лузги следует использовать приемы изменения термических свойств древесины при внешних воздействиях, а именно при увлажнении, при нагревании и при механическом воздействии [Аким, 2019; Лоскутов, 2024]. Этим достигается более плотное взаимоприлегание контактирующих частиц и обеспечивается расстекловывание субстрата на стадии горячего прессования плит. В целом должно достигаться с участием связующего требуемое межчастичное взаимодействие и качество изготавливаемых плит. Следует установить температурный интервал прессования материала, который определяется природой лузги и теми изменениями, которые произойдут при её модифицировании. Он устанавливается дериватографическими и термогравиметрическими исследованиями.

Методика исследований. Объектом исследования является подсолнечная лузга, полученная с предприятия АО «Казанский жировой комбинат», которая представляет отход при производстве подсолнечного масла.

Приведение геометрической формы субстрата, напоминающей собой «лодочку», к идеальной геометрии древесных частиц, условно напоминающей параллелепипед, обеспечивалось вальцеванием лузги с регулируемой величиной просвета между валками с последующей оптической регистрацией размеров получаемых расплюснутых частиц. Дисперсионный состав оценивали просеиванием на ситовом анализаторе с набором сит (10; 7; 5; 3; 2; 1 и 0,5 мм) с отбором и использованием фракций 7/5, 5/3 и 3/2 мм, составляющих $92 \pm 3\%$ исходной массы лузги.

Плотность определялась на вырезанных из боковых граней лузги частях размером $3,50 \times 3,50$ мм переменной толщины 0,13...0,28 мм, с ис-

пользованием электронного микроскопа отбирались частицы одного размера. Толщину измеряли микрометром с точностью $\pm 0,01$ мм. Взвешивание частиц проводили на аналитических весах. Распределение связующего по поверхности отобранных частиц определяли фотографированием с использованием микроскопа.

ТМ-кривые с установлением T_c (температуры стеклования) определяли на приборе Shimadzu TM-60. Дериватографические исследования с определением температур тепловых эффектов и потери массы при нагревании выполнены с использованием прибора Shimadzu DTG-60 (Инжиниринговый центр Санкт-Петербургского государственного технологического университета).

Кондиционную лузгу обрабатывали связующим из карбамидоформальдегидной смолы марки КФМТ-15 и отвердителя – хлорида аммония – с переменным расходом. Определение краевого угла смачивания образцов подсолнечной лузги проводили на основе методик [Угрюмов, 2009] с использованием электронного микроскопа.

Запрессовку плит производили на прессе марки АВБАК ERIKSSON HPA 500 X 500 X1X 160 TON при переменных параметрах (температура 180...220 °C; продолжительность прессования 0,25...0,5 мин/мм) с последующим кондиционированием образцов. Физико-механические испытания проводили по ГОСТ 10632-2014 «Плиты древесно-стружечные. Технические условия».

Результаты исследования. Модельное представление о частичке исходной лузги с дискретно нанесённым связующим в виде капель, представляемой и условно называемой «лодочкой», после облущивания приведено на рис. 1. Изображение носит иллюстрационный характер, тонкие чёрточки над каплями связующего условно изображают удельную свободную поверхностную энергию (УСПЭ), зависящую от расположения капли на конкретной точке поверхности частицы.

Располагая точки в ряд по их уменьшающимся значениям УСПЭ, имеем $1 > 2 > 3 > 4$. Вследствие энергетической неравномерности при нанесении связующего путем распыления («осмоления») оно максимально попадает на микрообласть 1. С точки зрения образования плиты наиболее желательна позиция 3, тогда как позиция 1 с максимальным количеством связующего вносит меньший вклад в монолитизацию материала. Кроме того, она при запрессовке с большей вероятностью отламывается и тогда практически не участвует в соединении частиц субстрата. Мы провели контрольную запрессовку лузги без связующего при соответствующих условиях прессования, и выяснилось по результатам фракционирования, что у подавляющего числа частиц (до 60%) этот фрагмент отделяется и переходит в мелочь, и не участвует в монолитизации готового материала.

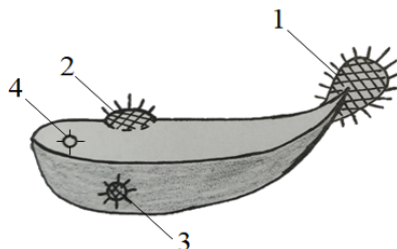


Рис. 1. Распределение УСПЭ характерных отдельных точек на поверхности плодовых оболочек подсолнечника

Fig. 1. Distribution SFSE on characteristic individual points on the surface of sunflower shell

Фрагмент частицы 2 плохо прилегает к соседним частицам, а позиция 4, находясь в глубине частицы, вообще может не вступать в контакт. По этой причине плиты, получаемые из исходных частичек в форме «лодочек», не удовлетворяют поставленным требованиям, даже несмотря на повышенный расход связующего. Наши данные по плитам из лузги с переменным расходом связующего подтверждают это положение (табл. 1).

Таблица 1

Показатели физико-механических свойств плит по типу ДСП с переменным расходом связующего

Indicators of physical and mechanical properties of the type of particle board with variable binder consumption

Доля связующего, %	Плотность ρ , кг/м ³	Прочность при изгибе $\sigma_{изг}$, МПа	Разбухание по толщине, %	Водопоглощение, %
10	607 ± 30	5,6 ± 0,3	20,0 ± 1,2	98,2 ± 6,8
20	603 ± 24	9,3 ± 0,4	15,6 ± 1,1	66,5 ± 4,7
30	612 ± 28	14,7 ± 0,7	18,5 ± 0,8	59,6 ± 3,6

Штатный расход КФС в производстве ДСП составляет 8...10 мас. %, тогда как существенное повышение связующего не обеспечивает надлежащей прочности плит из лузги на самую низкую марку ДСП (плиты Р-1, регламентируемые ГОСТ 10632-2014, прочность при изгибе ($\sigma_{изг}$) не менее 10,5 МПа (для плит толщиной свыше 6 до 13 мм включительно)). Водостойкость плит оказывается низкой, а длительное нахождение в воде приводит к неограниченному разбуханию образцов с любым осмосом.

Очевидная причина низкой прочности связана с нерациональным распределением связующего по поверхности частиц и недостаточно плотным прилеганием осмолённых частиц друг к другу. Увеличение расхода в 2-3 раза против норматива неприемлемо, поскольку увеличивает токсичность плит выше допустимого и приводит к такому росту себестоимости, что производство окажется нерентабельным и не найдёт потребителя.

Ранее на изготовление плит из лузги был взят патент [Глазков, 2000], однако по низкой прочности плит даже об опытно-промышленной выработке не сообщалось. Негативный опыт использования лузги привёл нас к необходимости включить в технологию трансформацию частиц путём перевода формы лодочки в новую форму наподобие древесных частиц. Этого достигли пропуская частицы через валки промышленных вальцов с определением оптимального просвета и последующей сортировкой с удалением не более 10% мелочи (табл. 2).

Таблица 2

**Влияние просвета при пропускании лузги между валками
на изменение площади лузги**

**Effect of the lumen when passing the husk between the rolls
on the change in the area of the husk**

Расстояние между валками, мм	Содержание кондиционной лузги, %	Содержание мелочи, %	$S_{\text{лузги}}, \text{мм}^2$	$\Sigma(S_{\text{связующего}}), \text{мм}^2$
0,10	$83,6 \pm 2,4$	$16,4 \pm 1,2$	$32,4 \pm 1,6$	$12,9 \pm 0,6$
0,20	$87,5 \pm 1,8$	$12,5 \pm 1,0$	$29,1 \pm 1,3$	$12,5 \pm 0,7$
0,30	$88,7 \pm 3,2$	$11,3 \pm 0,08$	$33,5 \pm 1,8$	$13,1 \pm 0,5$
0,40	$89,9 \pm 2,8$	$10,1 \pm 0,06$	$34,9 \pm 2,2$	$14,7 \pm 0,06$

Трансформация геометрических размеров привела к получению частиц, позволяющих добиться рациональной укладки их в ковёр, когда большая часть поверхности «работает» на образование плиты, – вступает в контакт между частицами. Полученные частицы характеризуются увеличенной в плоскости прессования поверхностью для контакта ($S_{\text{лузги}}$) и являются функцией давления, возникающего при пропускании лузги между валками.

По условиям горячего прессования решающее значение имеет температура размягчения (расстекловывания) вещества лузги при нагревании выше T_c для более плотного прилегания частиц друг к другу по условиям диффузионной теории адгезии. Для этого по общепринятой для полимеров методике определяли значения T_c на рис. 2.

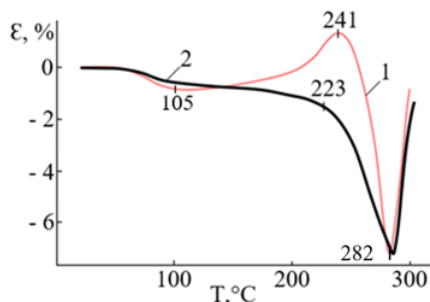


Рис. 2. ТМ-анализ таблетированных образцов лузги (1) и древесины берёзы (2)

Fig. 2. TM-analysis of tablet samples of husk (1) and birch wood (2)

Предварительно, в начале испытания, плунжер укладывается на неровности образца, и происходит его сушка (участок 20...105 °С). Он не характерен для изучения физико-механических изменений. Второй участок кривой (105...241 °С) отражает деформацию сжатия образца, обусловленную изменениями в структуре. Внутренняя энергия, запасённая при запрессовке образца, начинает преодолевать энергию взаимодействия структуры, и связи между частицами ослабевают. На ТМ-кривой для лузги фиксируется $T_c = 241 \pm 2^\circ\text{C}$. С дальнейшим нагреванием остаточные напряжения, возникшие при запрессовке образца, начинают проявляться и в нём при данной внешней нагрузке начинает происходить восстановление размеров, образец проявляет тенденцию возврата к положению до запрессовки. На кривой сжатия деформация восстановления размера образца показана с отрицательным знаком. Однако эти изменения еще не приводят к размягчению высокомолекулярных компонентов.

Значение T_c желательно обеспечить при горячем прессовании материала на основе лузги. Можно отметить, что в древесных композиционных материалах, например, в древесных волокнах и на модельном компоненте целлюлоза, значение T_c достоверно проявляется при более низкой температуре и в отсутствии пластификаторов составляет для целлюлозы 220 °С [Каргин и др., 1968; Леонович, 2022].

При температуре 282 °С, когда остаточные напряжения реализуются полностью и восстановление образца завершается, размягчение упругого компонента в лузге приводит к третьему участку проявления деформации сжатия системы в виде участка размягчения.

При сравнении деформирования лузги с древесиной в области T_c отметим, что оно проявляется в более высокой температурной области и, сле-

довательно, потребуется более высокая температура горячего прессования плит. Однако следует не превышать температуру активного термического разложения, что повлечёт за собой падение прочности частиц и плиты в целом. Эти температурные границы можно установить дериватографическим исследованием, приведённым на рис. 3.

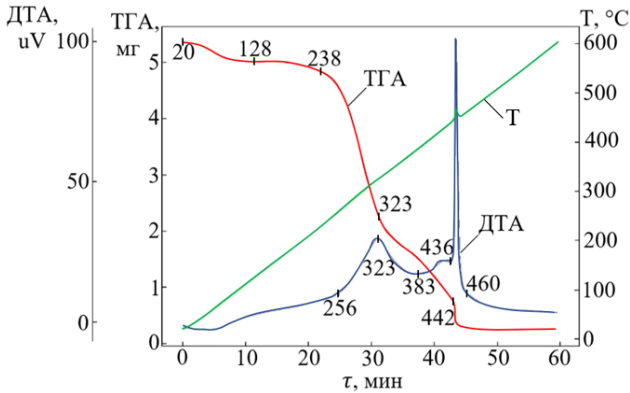


Рис. 3. Кривые термического анализа подсолнечной лузги

Fig. 3. Curves of thermal analysis of sunflower husk

Процесс термического разложения подсолнечной лузги можно разделить на несколько этапов. На первом этапе, который обусловлен сушкой, лузга к моменту достижения температуры 128 $^{\circ}C$ теряет всю влагу, и образец утрачивает 5,8% своей массы. На этом этапе не происходит образования органических летучих продуктов. Следующий этап – это термическое разложение, которое становится выраженным при температуре 238 $^{\circ}C$; к этой температуре нагревания масса образца уменьшается на 3,4%, происходит некоторое разложение менее термостойких компонентов лузги, сопровождающееся выделением реакционной воды, CO_2 , CO и некоторых других продуктов. Стадия от 238 до 323 $^{\circ}C$ – это активное термическое разложение (экзотермический процесс) и образование основной массы летучих продуктов разложения вещества лузги. Температуру 238 ± 3 $^{\circ}C$, как соответствующую началу максимальной скорости разложения, можно принять как предельную температуру горячего прессования. На этой стадии потеря массы составляет 54,6%. При дальнейшем нагревании на стадии 323–442 $^{\circ}C$ происходит более сложное разложение и конденсационные перегруппировки структуры. Такой высокотемпературный режим уже не имеет отношения к реальной технологии.

Таким образом, подсолнечная лузга отличается от древесины, в частности, более высокой устойчивостью и повышенной температурой размяг-

чения. Из анатомического строения лузги следует, что её наружный слой содержит воск, состоящий из сложных эфиров высокомолекулярных жирных кислот, высокомолекулярных спиртов и углеводов [Кирсанов и др., 2010]. По этой причине пригодность КФС ограничена плохой смачиваемостью поверхности и пониженной адгезионной способностью. Анализ клеевых соединений и варианты типов клеевых швов привели к выводу об особенностях лузги, когда нормальных клеевых швов вследствие локального соединения поверхностей лузги, происходящего на границе «связующее со связующим», оказывается меньше, чем ослабленных. В последних микрообласть контакта приходится за счёт капли, нанесённой только на одну из контактирующих поверхностей. Соотношение типов клеевых швов в пользу нормальных не может быть увеличено простым увеличением массовой доли связующего в рецептуре из-за ограничений в его экономически приемлемом расходе [Леонович и др., 2024].

Казалось бы, удалением внешнего воскового слоя, нагреванием и испарением можно улучшить смачиваемость и повысить качество клеевых швов. Однако оказалось, что разложением и испарением внешнего слоя повысить гидрофильность не только нельзя, но, напротив, при нагревании как наружных, так и внутренних слоёв уплотнённых частиц лузги смачиваемость раствором связующего КФМТ-15 значительно ухудшается. Об этом свидетельствуют значения равновесного краевого угла смачивания, найденные из известного уравнения Дюпре – Юнга, которые приведены в табл. 3 и выражены как среднее арифметическое значение; тут же приведена ошибка определения m , полученная с вероятностью $P = 0,95$ из шести параллельных образцов. Внутренний слой более гидрофобен под влиянием химического состава оболочки.

Таблица 3

**Определение смачиваемости подсолнечной лузги,
прошедшей термообработку**

Determination of the wettability of heat-treated sunflower husks

Температура обработки лузги, °C	Наружный слой		Внутренний слой	
	Краевой угол смачивания, град.	Ошибка m	Краевой угол смачивания, град.	Ошибка m
Исходная лузга	39	± 3	52	± 3
120	68	± 3	73	± 4
140	67	± 4	72	± 3

Выводы.

1. Оболочки семян подсолнечника (лузга) по плитообразующим параметрам, включая температурные характеристики, пригодность к адгезионному взаимодействию с полярными связующими, а также геометрическую форму, уступают древесному сырью, особенно заболонной части лиственных пород. Несмотря на экономическую привлекательность как сырья, требующего утилизации, использование лузги требует специальной технологии плитной переработки, что возможно на основе выявленных технологических особенностей.

2. Поскольку функциональное предназначение оболочек семян – защита от природных воздействий, то термическим анализом установили, что режим переработки в плитный материал потребует более жёстких параметров, в частности, для увеличения площади контакта необходимо изменить геометрическую форму (от так называемой «лодочки» к плоским частицам), повысить температуру горячего прессования для достижения её размягчения (для температуры 241 ± 2 °C), с ограничением предельного значения началом активного экзотермического распада вещества лузги – 256 ± 3 °C. Оптимальный температурный режим прессования лежит в пределах $241 \dots 256$ °C.

3. С целью приближения условий переработки к реальным техническим возможностям плитного производства необходимо изучить и подобрать условия повышения полярности лузги для возможности использования промышленно доступных синтетических связующих с одновременной пластификацией вещества лузги для снижения режима с тем, чтобы использовать прессовое оборудование, потенциал для модернизации которого уже исчерпан.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Аким Э.Л. Современные проблемы и перспективы био-рефайнинга растительного сырья // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IV НТК. СПб.: СПбГЛТУ, 2019. С. 262–264.

Ванишин В.В. Производство растительных масел. Оренбург: ОГУ, 2015. 243 с.

Глазков С.С. Патент № 2196045 «Способ изготовления плит из подсолнечной лузги». Оpubл. 10.01.2003.

Гнеуш А.Н., Юрина Н.А., Копыльцов С.В., Петенко А.И. Биоконверсия растительного сырья. Краснодар : КубГАУ, 2020. 187 с.

Каргин В.А., Козлов П.В., Най Чан Ван. О температуре стеклования целлюлозы // Доклады А.Н. СССР. 1968. Т. 130. № 2. С. 356–358.

Кирсанов М.П., Самойлова Н.А., Тимощук И.В. Экология: экозащитная техника и технологии на предприятиях масложирового, сахарного, дрожжевого, хлебопекарного, кондитерского производств. Кемерово: КемГУ, 2010. 176 с.

Леонович А.А. Физико-химические основы образования древесных плит. Вологда: Инфра-Инженерия, 2022. 224 с.

Леонович А.А., Куликов В.Н., Замазий Л.В., Овсянников Е.А. Вероятностный анализ клеевых соединений в материалах из измельчённых частиц // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IX ВНТК / под ред. А.А. Добровольского. СПб.: СПбГЛТУ, 2024. С. 405–408.

Лоскутов С.Р., Шапченкова О.А., Анискина А.А. Термические свойства и кинетика термодеструкции древесины хвойных и лиственных пород Сибири // Леса России: политика, промышленность, наука, образование: материалы IX ВНТК / под ред. А.А. Добровольского. СПб.: СПбГЛТУ, 2024. С. 411–414.

Плотникова Н.П., Чельшева И.Н. Исследование свойств теплоизоляционных материалов на основе лужги подсолнечника // Системы. Методы. Технологии. 2021. № 1(49). С. 86–89.

Ториков В.Е., Мельникова О.В. Научные основы агрономии. 4-е изд. СПб.: Лань, 2024. 348 с.

Угрюмов С.А. Исследование свойств плитных материалов на основе различных наполнителей // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. 2001. № 5. С. 143–146.

Угрюмов С.А. Совершенствование технологии производства композиционных материалов на основе древесных наполнителей и костры льна: дисс. ... д-ра техн. наук: 05.21.05. М.: МГУЛ, 2009. 373 с.

References

Akim E.L. Modern problems and prospects of bio – refining of vegetable raw materials. *Forest of Russia: politics, industry, science, education: materials of the IV NTC*. St. Petersburg: SPbFTU, 2019, pp. 262–264. (In Russ.)

Glazkov S.S. Patent No. 2196045 «The method of making plates from sunflower husks». Publ. 10.01.2003. (In Russ.)

Gneush A.N., Yurina N.A., Kopyltsov S.V., Petenko A.I. Bioconversion of plant raw materials. Krasnodar : KubSAU, 2020. 187 p. (In Russ.)

Kargin V.A., Kozlov P.V., Nai Chan Wang. On the glass transition temperature of cellulose. *Reports of A.N. USSR*, 1968, vol. 130, no. 2, pp. 356–358. (In Russ.)

Kirsanov M.P., Samoiloa N.A., Tymoshchuk I.V. Ecology:eco-protective equipment and technologies at enterprises of fat-and-oil, sugar, yeast, bakery, confectionery industries. Kemerovo: KemSU, 2010. 176 p. (In Russ.)

Leonovich A.A. Physico-chemical foundations of the formation of wood slabs. Vologda: Infra-Engineering, 2022. 224 p. (In Russ.)

Leonovich A.A., Kulikov V.N., Zamaziy L.V., Ovsyannikov E.A. Probabilistic analysis of adhesive compounds in materials from crushed particles. *Forests of Russia: politics, industry, science, education: materials of the VNTC*. Ed. by A.A. Dobrovolsky. St. Petersburg: SPbFTU, 2024, pp. 405–408. (In Russ.)

Loskutov S.R., Shapchenkova O.A., Aniskina A.A. Thermal properties and kinetics of thermal degradation of Siberian coniferous and deciduous wood. *Forests of Russia:*

politics, industry, science, education: materials of the VNTC. Ed. by A.A. Dobrovolsky. St. Petersburg: SPbFTU, 2024, pp. 411–414. (In Russ.)

Plotnikova N.P., Chelysheva I.N. Investigation of the properties of thermal insulation materials based on sunflower husk. *Methods. Technologies*, 2021, no. 1(49), pp. 86–89. (In Russ.)

Torikov V.E., Melnikova O.V. Scientific foundations of agronomy. 4th ed. St. Petersburg: Lan, 2024. 348 p. (In Russ.)

Ugryumov S.A. Improving the technology of production of composite materials based on wood fillers and flax bonfires: diss. ... Doctor of Technical Sciences: 05.21.05. M.: MSUF, 2009. 373 p. (In Russ.)

Ugryumov S.A. Investigation of the properties of slab materials based on various fillers. *MSUF Bulletin is a forest bulletin*, 2001, no.5, pp. 143–146. (In Russ.)

Vanshin V.V. Production of vegetable oils. Orenburg : OSU, 2015. 243 p. (In Russ.)

Материал поступил в редакцию 08.05.2024

Леонович А.А., Замазий Л.В. Подсолнечная лузга как сырьё для плит типа ДСП // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 369–380. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.369-380

Изучали особенности свойств оболочек семян подсолнечника с целью использования лузги при изготовлении плитных материалов. Для ликвидации неприемлемой формы «лодочки» придавали им форму плоских частиц пропуская лузги через валки с задаваемой величиной просвета 0,1...0,4 мм. Установили ухудшение смачиваемости раствором карбамидоформальдегидного связующего наружных и внутренних поверхностей при нагревании до температуры 140 °С. Установили повышенную по сравнению с древесиной жёсткость лузги в отношении размягчения и граничные значения параметров горячего прессования, которые лежат в пределах от 241 ± 2 °С – нижнее значение, до 256 °С – верхнее значение, которое лимитируется активным термическим разложением вещества лузги. Для практического использования лузги в производстве плит требуется включить в технологию повышенный расход связующего или разработать подходящие приёмы пластификации лузги для снижения температуры размягчения и возможности использования прессового оборудования, потенциал для модернизации которого уже исчерпан. Вероятная область изготовления плитного материала из лузги – строительство, вероятные марки плит – Р-1 и Р-2.

Ключевые слова: подсолнечная лузга, геометрическая модификация формы плодовой оболочки, модель распределения удельной свободной поверхностной энергии семенной оболочки, дериватографическое исследование лузги, температура размягчения лузги, смачиваемость поверхности частиц лузги.

Leonovich A.A., Zamaziy L.V. Sunflower husk as a raw material for particle board type plates. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotehniceskoy Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 369–380 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.369-380

The properties of sunflower seed shells were studied in order to use husks in the manufacture of slab materials. To eliminate the unacceptable shape of the "boats", they were shaped into flat particles by passing husks through rolls with a set lumen value of 0.1...0.4 mm. A deterioration in the wettability of the urea-formaldehyde binder solution of the outer and inner surfaces was found when heated to a temperature of 140 °C. The hardness of the husk increased in terms of softening compared to wood and the boundary values of the hot pressing parameters, which range from 241 ± 2 °C – the lower value, to 256 °C – the upper value, which is limited by the active thermal decomposition of the husk substance, were established. For the practical use of husks in the production of plates, it is necessary to include increased binder consumption in the technology or develop suitable husk plasticization techniques to reduce the softening temperature and the possibility of using pressing equipment, the potential for modernization of which has already been exhausted. The probable area of manufacture of slab material from husk is construction, the probable grades of plates – P-1 and P-2.

Key words: sunflower husk, geometric modification of the shape of the fruit shell, model of the distribution of the specific free surface energy of the seed shell, derivatographic study of the husk, the softening temperature of the husk, the wettability of the surface of the husk particles.

ЛЕОНОВИЧ Адольф Ануфриевич – профессор Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, доктор технических наук, заслуженный деятель науки РФ. SPIN-код: 1378-5709.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: wood-plast@mail.ru

LEONIVICH Adol'f A. – DSc (Technical), Professor, St.Petersburg State Forest Technical University, Honored Scientist of the Russian Federation. SPIN-code: 1378-5709.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: wood-plast@mail.ru

ЗАМАЗИЙ Леонид Витальевич – аспирант Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: zamaziyl@gmail.com

ZAMAZIY Leonid V. – PhD student, St.Petersburg State Forest Technical University.

194021, Institute per. 5, St. Petersburg, Russia. E-mail: zamaziyl@gmail.com

Д.В. Иванов, П.К. Никифорова, М.Ю. Захаренкова

**СВОЙСТВА КАРБАМИДОФОРМАЛЬДЕГИДНЫХ СМОЛ,
СИНТЕЗИРОВАННЫХ ПРИ РАЗНЫХ МОЛЬНЫХ СООТНОШЕНИЯХ
КАРБАМИД : ФОРМАЛЬДЕГИД**

Введение. Одним из основных компонентов древесных плит является синтетическое связующее. Связующее образует матрицу плит, обеспечивает сохранение их формы и способность сопротивляться физическим воздействиям. Такие эксплуатационные характеристики, как водостойкость и токсичность древесных плит, определяются именно видом и свойствами связующего.

В настоящее время наиболее востребованы связующие на основе карбамидоформальдегидных смол (КФС), которые представляют собой водные растворы карбамидоформальдегидных олигомеров (КФ-олигомеров) и остаточных низкомолекулярных соединений, таких как метилольные производные карбамида, свободные карбамид и формальдегид, остатки катализаторов и т. д. Свойства КФС определяются их рецептурой, условиями синтеза и видом используемого химического сырья.

Наибольшее распространение в производстве КФС получили безметанольные источники формальдегида, такие как карбамидоформальдегидный концентрат и концентрированный формалин. Классической считается схема синтеза КФС в условиях с переменным рН. Согласно этой схеме на первом этапе синтеза проводят выдержку реакционной смеси в щелочной среде при мольном соотношении карбамид : формальдегид (К : Ф) 1 : 1,9–4,0, на втором этапе проводят поликонденсацию полученных метилольных производных карбамида в кислой среде, на третьей стадии величину рН смеси поднимают до слабощелочных значений и вводят в реакционную смесь дополнительный карбамид, обеспечивая конечное мольное соотношение К : Ф. Как правило, в зависимости от конечного мольного соотношения выделяют мало-, средне- и высокомолекулярные КФС (К : Ф = 1 : <1,1; 1 : 1,1–1,2 и 1 : >1,2 соответственно).

Цель работы – установить влияние мольного соотношения К : Ф на строение компонентов КФС, свойства смол и изготовленных с их использованием древесностружечных плит (ДСтП).

Экспериментальная часть. Для синтеза КФС использовали параформ марки С (ТУ-6-09-141-03–89), карбамид технический марки А

(ГОСТ 2081–2010), гидроксид натрия ЧДА (ГОСТ 4328–77) в виде водного раствора концентрацией 40%, сульфат аммония ЧДА (ГОСТ 3769–78) в виде водного раствора концентрацией 20%, дистиллированную воду.

Синтез вели в трёхгорлой колбе, снабжённой механической мешалкой, термометром и обратным холодильником. Нагрев реакционной смеси вели с использованием водяной бани. В колбу загружали дистиллированную воду, после чего водным раствором гидроксида натрия pH доводили до 8,5–9,0. Полученный раствор нагревали до 70–75 °C и в течение 25 мин загружали параформ, в ходе растворения которого величина pH смеси падала до 8,0–8,5.

После растворения параформа температуру смеси поднимали до 75–80 °C и загружали основной карбамид; за счёт тепла экзотермической реакции температура смеси поднималась до 88–92 °C. Реакционную смесь выдерживали 30 мин, после чего водным раствором сульфата аммония величину pH опускали до 4,5–5,0. В слабокислой среде реакционную смесь выдерживали при 88–92 °C до тех пор, пока проба смеси не образовывала хлопья при смешивании с холодной водой. Далее величину pH поднимали до 8,0–8,5, температуру смеси снижали до 65–70 °C и загружали дополнительный карбамид. Реакционную смесь выдерживали 30 мин, после чего готовую смолу охлаждали до температуры 25–28 °C и сливали в приёмную ёмкость.

Рецептуры синтезированных смол представлены в табл. 1. В ходе работы варьировали только количество дополнительного карбамида, вводимого на третьей стадии синтеза. Таким образом меняли конечное мольное соотношение К : Ф, начальное соотношение не менялось и составляло 1 : 2.

При анализе КФС определяли массовую долю сухого остатка высушиванием, условную вязкость с использованием вискозиметра ВЗ-4, концентрацию водородных ионов (pH) с использованием прибора pH-410, продолжительность желатинизации при 100 °C (всё по ГОСТ 14231–88), массовые доли свободного формальдегида и метилольных групп по методикам, описанным в пособии [Кастерина, Калинина, 1963].

Готовую КФС изучали с помощью спектров ЯМР ^{13}C ; в качестве растворителей при подготовке образцов к получению спектров использовали диметилсульфоксид. 300 мкл смолы смешивали с 150 мкл растворителя. Использовали спектрометр «Bruker» при частоте 100 МГц, проводили 1024 измерения в течение 1 ч.

Отверждённые образцы КФС исследовали с помощью ИК-спектроскопии. Для этого 5 г смолы переносили в стеклянный бюкс и подвергали термообработке в термостате при 110 °C в течение 2,5 мин (таким образом воспроизводили температуру внутреннего слоя в ходе горячего прессования ДСтП). Полученный карбамидоформальдегидный полимер (КФ-полимер)

измельчали и отбирали порошок, прошедший через сито с диаметром ячеек 0,5 мм и оставшийся на поддоне. ИК-спектры получали на спектрометре марки ФСМ-1201, спектральный диапазон которого составляет 400...7800 см^{-1} ; спектральное разрешение – 1,0 см^{-1} .

Таблица 1

Рецептура синтезированных карбамидоформальдегидных смол

Recipe of the investigated UF resins

Показатель	Значение показателя					
Обозначение смолы	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5
Мольное соотношение К : Ф	1 : 1,0	1 : 1,1	1 : 1,2	1 : 1,3	1 : 1,4	1 : 1,5
Рецептура, масс. ч.:						
карбамид основной	100	100	100	100	100	100
формальдегид	99,98	99,98	99,98	99,98	99,98	99,98
карбамид дополнительный	100	81,82	66,67	53,82	42,86	33,33
сульфат аммония	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06	0,06
гидроксид натрия	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12	0,12
вода	115,14	108,07	102,17	97,19	92,92	89,21

Изготавливали однослойные ДСтП размером 200×200×10 мм расчётной плотностью 650 кг/м^3 . Температура греющих плит пресса составляла 220 °С, давление прессования 2,8 МПа, удельная продолжительность прессования 0,15 мин/мм толщины готовой плиты. Использовали игольчатую березовую стружку с абсолютной влажностью 2%. Массовая доля абс. сух. смолы в связующем составляла 55%. В качестве отвердителя использовали водный раствор сульфата аммония концентрацией 20%; содержание абс. сух. сульфата аммония в связующем составляло 1% относительно абс. сух. смолы. Осмоление стружки проводили путём пневматического распыления связующего. Расход абс. сух. смолы составлял 12% от массы абс. сух. стружки.

В ходе испытаний ДСтП определяли плотность, разбухание и водопоглощение в холодной воде за 24 ч (всё по ГОСТ 10634–88), прочность при изгибе (ГОСТ 10635–88), прочность при растяжении перпендикулярно к пласти плиты (ГОСТ 10636–2018), содержание формальдегида модифицированным баночным методом [Васильев, 2024].

Результаты исследования. Физико-химические показатели полученных КФС приведены в табл. 2. Все синтезированные смолы имеют сопоставимую массовую долю сухого остатка и величину pH. Смола 1,2 (моль-

ное соотношение $K : \Phi = 1 : 1,2$) по всем показателям соответствует требованиям, предъявляемым к КФС марки КФ-МТ-15 согласно ТУ 6-06-12–88. Увеличение количества дополнительного карбамида в рецептуре смолы приводит к снижению условной вязкости КФС и содержания метилольных групп, а также к увеличению продолжительности желатинизации. При снижении количества дополнительного карбамида относительно значения, принятого для смолы 1,2, условная вязкость КФС и содержание метилольных групп увеличиваются, продолжительность желатинизации смолы снижается.

Таблица 2

**Физико-химические свойства синтезированных
карбамидоформальдегидных смол**

Properties of the investigated UF resins

Наименование показателя	Мольное соотношение $K : \Phi$					
	1 : 1,0	1 : 1,1	1 : 1,2	1 : 1,3	1 : 1,4	1 : 1,5
$C, \%$	66,5	66,5	65,9	66,6	67,7	66,5
$\eta_{\text{усл}}, \text{с}$	25	32	51	57	54	98
pH	8,0	7,9	8,0	8,1	7,9	8,0
$\tau_{\text{отв}}, \text{с}$	72	63	54	51	37	41
$C_{\text{с.ф}}, \%$	0,07	0,09	0,10	0,11	0,22	0,34
$C_{\text{м.г}}, \%$	13,8	15,1	17,6	17,8	19,3	19,5

Обозначения: C – массовая доля сухого остатка; $\eta_{\text{усл}}$ – условная вязкость; $\tau_{\text{отв}}$ – продолжительность желатинизации при 100 °С; $C_{\text{с.ф}}$ – содержание свободного формальдегида; $C_{\text{м.г}}$ – содержание метилольных групп

Ожидается, смолы, синтезированные при высоком мольном соотношении $K : \Phi$, отличаются повышенной реакционной способностью (низким временем желатинизации), что может быть связано со сравнительно высоким содержанием свободного формальдегида и метилольных групп. Свободный формальдегид вступает в реакцию с солями аммония с образованием кислоты, являющейся катализатором поликонденсации [Эльберт, 1984], в то время как метилольные группы являются основными реакционными центрами КФ-олигомеров, обеспечивающими формирование сетчатого полимера в ходе отверждения смолы.

На спектрах ЯМР ^{13}C всех синтезированных смол (рис. 1) отсутствуют сигналы, характерные для метанола (CH_3OH) и продуктов его взаимодей-

ствия с формальдегидом и метилольными группами. По всей видимости, в ходе синтеза формальдегид не превращается в метанол по реакции Каницаро-Тищенко [Огородников, 1984] либо метанол образуется в незначительных количествах, не позволяющих обнаружить его методом спектроскопии ЯМР ^{13}C . Исходного метанола реакционная смесь не содержала, так как для синтеза было использовано безметанольное сырьё.

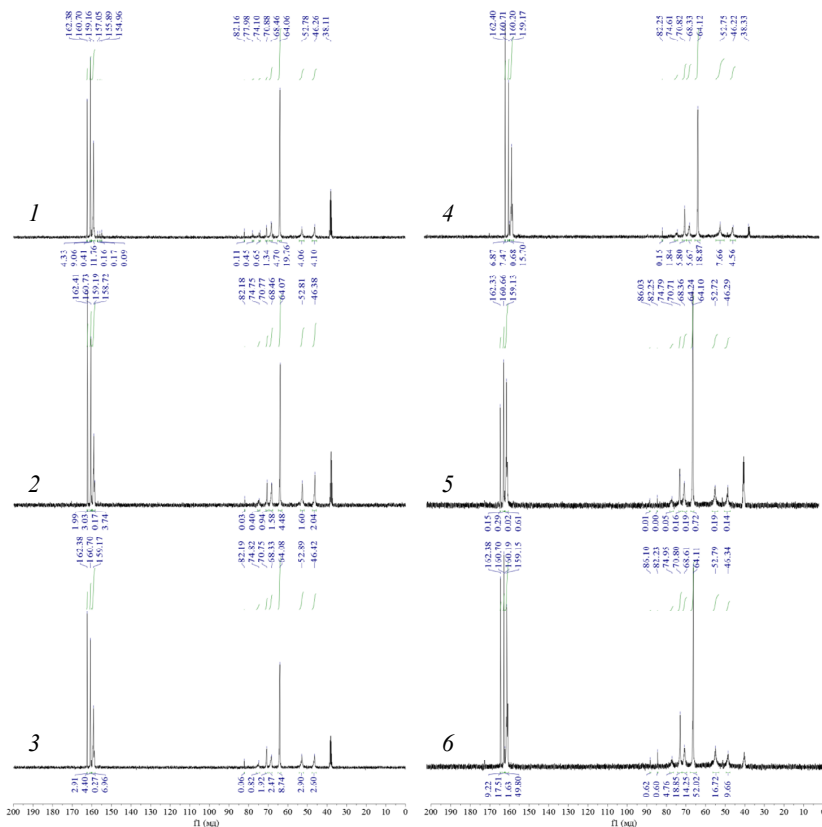


Рис. 1. Спектры ЯМР ^{13}C карбамидоформальдегидных смол, синтезированных при мольном соотношении карбамид : формальдегид:

1 – 1 : 1,0; 2 – 1 : 1,1; 3 – 1 : 1,2; 4 – 1 : 1,3; 5 – 1 : 1,4; 6 – 1 : 1,5 (1000 МГц, ДМСО)

Fig. 1. ^{13}C NMR spectra of UF resins with F/U molar ratio of 1 – 1.0; 2 – 1.1; 3 – 1.2; 4 – 1.3; 5 – 1.4; 6 – 1.5 (1000 MHz, DMSO)

На спектрах смолы 1,0 не наблюдаются сигналы, характерные для свободного формальдегида. Начиная с мольного соотношения К : Ф, равного 1 : 1,1, на спектрах появляются сигналы в области 84...85 м.д., характерные для метандиола (НО–СН₂–ОН). На спектрах смол 1,4 и 1,5 появляются сигналы в области 86–87 м.д., характерные для параформальдегида.

Результаты количественного анализа синтезированных смол, выполненного методом спектроскопии ЯМР ¹³С, приведены в табл. 3 и 4. С увеличением количества дополнительного карбамида, вводимого на третьей стадии синтеза, в КФС снижается содержание метилольных групп и свободного формальдегида, что согласуется с результатами химического анализа изучаемых смол (табл. 1).

Таблица 3

Характеристика спектров ЯМР карбамидоформальдегидных смол, синтезированных при мольном соотношении карбамид : формальдегид, равном 1 : 1,0–1,2

¹³C NMR assignments and their quantitative analysis results of UF resins with F/U molar ratio of 1.0, 1.1 and 1.2

Структура	Химический сдвиг, м.д	Мольное соотношение К : Ф		
		1 : 1,0	1 : 1,1	1 : 1,2
Метиленовый углерод	–	100	100	100
Метиленовые связи	–	34,47	32,88	28,19
–NH– <u>С</u> H ₂ –NH– (тип I)	46–48	19,22	18,43	13,33
–NH– <u>С</u> H ₂ –N= (тип II)	53–55	15,25	14,45	14,86
Диметиленэфирные связи	–	16,52	17,89	16,86
–NH– <u>С</u> H ₂ –O– <u>С</u> H ₂ –NH– (тип I)	68–70	12,79	14,27	12,66
–NH– <u>С</u> H ₂ –O– <u>С</u> H ₂ –N= (тип II)	75–77	3,73	3,61	4,20
Метилольные группы	–	49,01	48,96	54,64
–NH– <u>С</u> H ₂ OH (тип I)	64–66	41,38	40,47	44,80
=NH– <u>С</u> H ₂ OH (тип II)	71–72	7,36	8,49	9,84
Свободный формальдегид	83–95	–	0,27	0,31
Карбонильный углерод	–	100	100	100
уроновая структура	158–159	0,36	–	–
–NH–C(O)–NH–	159–161	37,51	41,88	47,87
H ₂ N–C(O)–NH–	161–162	35,38	35,83	32,12
H ₂ N–C(O)–NH ₂	163–164	26,68	22,28	20,01

Таблица 4

**Характеристика спектров ЯМР карбамидоформальдегидных смол,
синтезированных при мольном соотношении карбамид : формальдегид,
равном 1 : 1,3–1,5**

**^{13}C NMR assignments and their quantitative analysis results of UF resins
with F/U molar ratio of 1.3, 1.4 and 1.5**

Структура	Химический сдвиг, м.д	Мольное соотношение К : Ф		
		1 : 1,3	1 : 1,4	1 : 1,5
Метиленовый углерод	–	100	100	100
Метиленовые связи	–	27,55	22,60	22,45
–NH– <u>CH</u> ₂ –NH– (тип I)	46–48	10,28	9,59	8,22
–NH– <u>CH</u> ₂ –N= (тип II)	53–55	17,27	13,01	14,23
Диметиленэфирные связи	–	16,48	16,44	16,18
–NH– <u>CH</u> ₂ –O– <u>CH</u> ₂ –NH– (тип I)	68–70	12,78	13,01	12,13
–NH– <u>CH</u> ₂ –O– <u>CH</u> ₂ –N= (тип II)	75–77	3,70	3,42	4,05
Метилольные группы	–	55,63	60,27	60,33
–NH– <u>CH</u> ₂ OH (тип I)	64–66	42,55	49,32	44,28
=NH– <u>CH</u> ₂ OH (тип II)	71–72	13,08	10,96	16,05
Свободный формальдегид	83–95	0,34	0,74	1,04
Карбонильный углерод	–	100	100	100
–NH–C(O)–NH–	159–161	51,11	57,01	63,72
H ₂ N–C(O)–NH–	161–162	26,53	28,97	24,49
H ₂ N–C(O)–NH ₂	163–164	22,36	14,02	11,80

Увеличение количества дополнительного карбамида в реакционной смеси приводит к значительному снижению в готовых смолах доли ядер ^{13}C структур (–NH–C(O)–NH–), увеличению содержания остаточного карбамида и структур (–NH–C(O)–NH₂). Содержание метиленовых и диметиленэфирных связей при этом снижается. Вероятно, при высоком мольном соотношении К : Ф дополнительный карбамид реагирует преимущественно со свободным формальдегидом. При низком мольном соотношении в реакционной смеси создаётся избыток активных аминогрупп, для нейтрализации которых имеющегося количества свободного формальдегида недостаточно. Увеличение содержания метиленовых и диметиленэфирных связей, в таком случае, можно объяснить взаимодействием дополнительного карбамида с метилольными группами КФ-олигомеров и метилолкарбамидов.

Известно [Вирпша, Бжезинский, 1973], что метилольные группы взаимодействуют с аминокруппами, главным образом, в присутствии кислот. В щелочной среде образование метиленовых связей также возможно, однако для этого требуется избыток карбамида (мольное соотношение $K : \Phi = 1 : 1,0$) и жёсткие условия реакции. В работе [Li et al., 2015] получали содержащие метиленовые связи КФ-олигомеры в щелочной среде (рН 8,0–9,5) при температуре реакционной смеси от 80 °С. Авторы использовали в качестве источника формальдегида формалин концентрацией 37% с содержанием метанола 8%; возможно, в безметанольной среде поликонденсация будет идти и в сравнительно мягких условиях.

Рост общего содержания метиленовых связей в КФС при увеличении количества дополнительного карбамида сопровождается изменением соотношения метиленовых связей I и II типов. Так, в смоле 1,0 на 1 метиленовую связь II типа приходится 1,3 связи I типа, а в смолах 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 и 1,5 – 1,3, 0,9, 0,6, 0,6 и 0,6 связей соответственно. Таким образом, КФ-олигомеры, синтезированные при высоком конечном мольном соотношении $K : \Phi$, обладают большим количеством ответвлений от основной цепи, что согласуется с существующими представлениями о строении КФС [Романов, 2016; Rammon et al., 1986]. Согласно данным, приведённым в работе [Mejdell, Schjønby, 2004], с ростом количества разветвлений в КФ-олигомерах увеличивается вязкость смол, что хорошо согласуется с результатами определения физико-химических показателей изучаемых КФС (табл. 2).

Помимо уменьшения содержания метиленовых связей II типа, при увеличении количества дополнительного карбамида в реакционной смеси в готовых смолах снижается доля ядер ^{13}C , относящихся к метилольным группам II типа. Авторы работы [Wang et al., 2018] считают, что из-за большей активности первичных аминокрупп по сравнению со вторичными аминокруппами метилольная группа II типа может переходить от КФ-олигомеров к карбамиду с образованием монометилкарбамида. Таким образом, КФ-олигомеры маломольных КФС имеют преимущественно линейное строение и содержат значительно меньше метилольных групп, способных образовывать поперечные связи (сшивки) при отверждении.

ИК-спектры отверждённых КФС (рис. 2) в основном отличаются сигналами в областях 2960, 1560 и 1437 см^{-1} . Полоса поглощения в области 2960 см^{-1} характерна для валентных колебаний связи С–Н метиленовых групп, которые могут относиться к метоксильным [Плотникова, Плотников, 2013; Dorieh et al., 2018] или метилольным [Christjanson et al., 2009; Aizat et al., 2019] группам, а также к диметиленэфирным и метиленовым связям [Li et al., 2021]. Полоса поглощения 1560 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям связи N–H вторичных амидов (полоса амид II), которые относятся к структурам $(-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{NH}-)$ полимера. Полоса погло-

щения в области 1437 см^{-1} соответствует деформационным колебаниям связи С–Н, которые могут относиться к метоксильным [Dorieh et al., 2018] и метилольным [Dorieh et al., 2018; Aizat et al., 2019] группам, а также к метиленовым [Dorieh et al., 2018; Xu et al., 2021] связям.

На спектре отверждённой смолы 1,0 (К : Ф = 1 : 1,0) наблюдается наличие сильной полосы в области 1560 см^{-1} , что говорит об относительно высоком содержании в КФ-полимере структур, которые могут относиться к остаточным метилолкарбамидам или фрагментам полимера, не содержащим поперечных связей (линейным фрагментам). В спектрах отверждённых смол 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 и 1,5 полоса поглощения в области 1560 см^{-1} становится менее отчётливой; возможно, полимеры смол, синтезированных при среднем и высоком мольном соотношении К : Ф, имеют более густую сетчатую структуру или не содержат остаточных метилолкарбамидов. Аминогруппы КФ-полимеров, в таком случае, относятся к третичным амидам вида ($>\text{N}-\text{CH}_2-\text{N}<$), т. е. большинство атомов азота в полимере средне- и высокомолярных смол связано с двумя атомами углерода метиленовых групп.

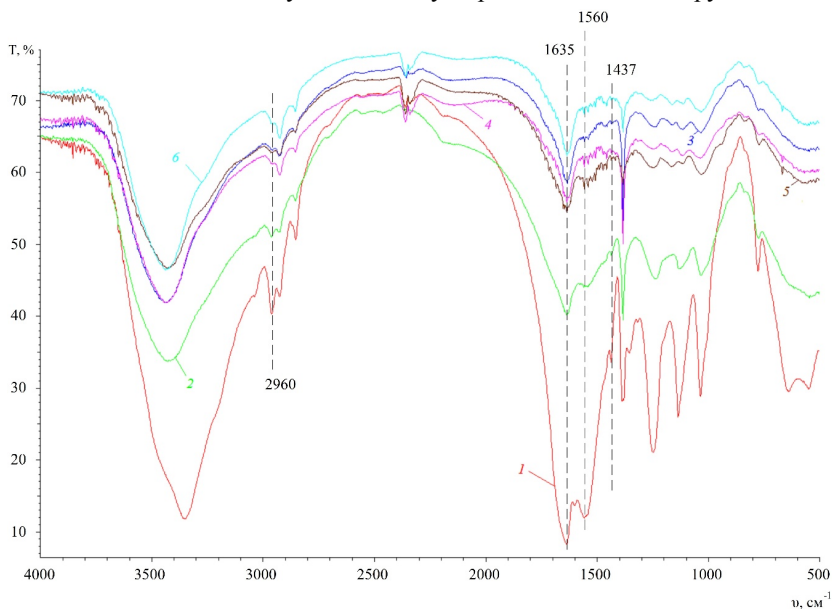


Рис. 2. ИК-спектры отверждённых карбамидоформальдегидных смол, синтезированных при мольном соотношении карбамид : формальдегид: 1 – 1 : 1,0; 2 – 1 : 1,1; 3 – 1 : 1,2; 4 – 1 : 1,3; 5 – 1 : 1,4; 6 – 1 : 1,5

Fig. 2. FTIR spectra of cured UF resins with F/U molar ratio of 1 – 1.0; 2 – 1.1; 3 – 1.2; 4 – 1.3; 5 – 1.4; 6 – 1.5

По мере увеличения количества дополнительного карбамида при синтезе смол на спектрах отверждённых образцов становятся менее отчётливы полосы поглощения в областях 2960 и 1437 см^{-1} , что может быть связано с меньшим содержанием в полимерах средне- и высокомолярных смол остаточных метилольных групп, метоксильных групп или так называемых линейных метиленовых связей, относящихся к структурам $(-\text{NH}-\text{CH}_2-\text{NH}-)$.

Поскольку в синтезированных КФС метанола и его производных обнаружено не было (рис. 1), образование метоксильных групп в ходе отверждения смол маловероятно. Сравнительно низкое содержание остаточных метилольных групп может свидетельствовать о более глубоком отверждении смол 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 и 1,5 по сравнению со смолой 1,0; сравнительно низкое содержание линейных метиленовых связей в отверждённых средне- и высокомолярных смолах может свидетельствовать о большем количестве в полимерах смол 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 и 1,5 структур третичных амидов, т. е. о более густой сетчатой структуре. В пользу последнего предположения (более густая сетчатая структура полимеров средне- и высокомолярных смол) также свидетельствует снижение в ИК-спектрах отверждённых смол 1,1, 1,2, 1,3, 1,4 и 1,5 интенсивности сигнала в области 1560 см^{-1} .

Поскольку КФ-олигомеры маломолярных КФС имеют преимущественно линейное строение и содержат сравнительно мало метилольных групп II типа, во время отверждения смолы образуется сетчатая структура с незначительным количеством поперечных метиленовых связей. Так, в работах [Park, Jeong, 2011; Li et al., 2021] методом рентгеноструктурного анализа установлено, что отверждённые маломолярные смолы представляют собой полимеры с высоким содержанием кристаллической фазы, в которой сшивки между исходными КФ-олигомерами образованы не химическими, а водородными связями. Поскольку водородные связи легко разрушаются под действием воды, их наличие может быть причиной низкой водостойкости материалов, изготовленных из маломолярных КФС. Однако авторы работы [Park, Jeong, 2011] показывают, что потеря массы у полимеров маломолярных смол при воздействии на них воды меньше, чем у полимеров высокомолярных смол. Тем не менее, потеря массы не означает разрушение полимера; авторы работы [Wang et al., 2018] предполагают, что при выдержке в воде отверждённых КФС гидролизуются остаточные метилольные группы, при этом сетчатая структура полимера сохраняется. Таким образом, водостойкость отверждённых КФС в большей степени определяется количеством поперечных метиленовых связей, чем содержанием кристаллической фазы.

Результаты определения физико-механических показателей ДСтП подтвердили низкую водостойкость плит, изготовленных с использованием маломольных КФС (табл. 5); полученные данные согласуются с результатами схожих работ [Вьюнков, Васильев, 2019; Corrêa et al., 2024]. Поскольку при изготовлении ДСтП не использовали гидрофобные добавки, разбухание и водопоглощение плит определялись только водостойкостью связующего.

Таблица 5

Физико-механические показатели древесностружечных плит**Properties of particleboard**

Наименование показателя	Мольное соотношение карбамид : формальдегид					
	1 : 1,0	1 : 1,1	1 : 1,2	1 : 1,3	1 : 1,4	1 : 1,5
ρ , кг/м ³	628	644	640	645	658	645
$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	12,9	15,0	21,6	26,4	26,0	27,0
$\sigma_{\perp}$, МПа	0,08	0,10	0,36	0,29	0,35	0,40
ΔS за 24 ч, %	73	55	44	33	30	26
ΔW за 24 ч, %	157	145	121	101	98	102
$E_{\text{ф}}$, мг/100 г	7,6	11,8	18,4	34,4	48,2	73,1
Показатели, приведённые к плотности 650 кг/м ³						
$\sigma_{\text{изг}}$, МПа	14,4	15,5	22,5	26,9	25,2	28,2
$\sigma_{\perp}$, МПа	0,10	0,13	0,39	0,29	0,38	0,43
ΔS за 24 ч, %	76	59	45	34	31	28

Обозначения: ρ – плотность; $\sigma_{\text{изг}}$ – предел прочности при изгибе; $\sigma_{\perp}$ – предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти; ΔS – разбухание по толщине; ΔW – водопоглощение; $E_{\text{ф}}$ – содержание формальдегида

Результаты определения физико-механических показателей ДСтП подтверждают меньшую реакционную способность маломольных смол. Предел прочности при растяжении перпендикулярно к пласти у плит на основе смолы 1,0 падает по сравнению с плитами на основе смолы 1,5 в 4,3 раза, что косвенно свидетельствует о недостаточном отверждении связующего во внутреннем слое. При этом прочность при изгибе у плит со смолой 1,0 только в 2 раза меньше, чем у плит со смолой 1,5. Высокая температура наружных слоёв во время горячего прессования ДСтП (180–220 °С) позволяет компенсировать низкую реакционную способность мало-

мольных смол, однако они по-прежнему значительно уступают смолам со средним и высоким мольным соотношением $K : \Phi$ по способности обеспечивать высокую прочность. Возможно, при высокой температуре горячего прессования имеет место деструкция отверждённых маломольных КФС, так как известно, что термостойкость сетчатых полимеров, так же как и водостойкость, зависит от числа поперечных связей [Николаев, 1966].

Все изготовленные ДСтП отличаются высоким содержанием формальдегида. Даже плиты на основе смолы 1,0 соответствуют только классу эмиссии E1 согласно ГОСТ 10632–2014 (не более 8 мг/100 г абс. сух. плиты). Так как содержание свободного формальдегида в смоле 1,0 низкое (табл. 2), основным источником формальдегида в ДСтП, скорее всего, являются диметиленэфирные связи, которые в ходе горячего прессования плит превращаются в метиленовые с образованием формальдегида.

Средне- и высокомольные смолы содержат сопоставимое количество диметиленэфирных связей по сравнению со смолой 1,0. Высокомольные смолы отличаются высоким содержанием свободного формальдегида, однако в смоле 1,5 по сравнению со смолой 1,0 свободного формальдегида больше в 4,9 раза, в то время как в плите на основе смолы 1,5 по сравнению с плитой на основе смолы 1,0 содержание формальдегида больше почти в 10 раз. Возможно, значительную роль играет низкое содержание остаточного карбамида в высокомольных смолах, так как карбамид в ходе отверждения может выполнять функцию акцептора формальдегида, т.е. взаимодействовать со свободным и поликонденсационным формальдегидом.

Выводы

1. Строение компонентов карбамидоформальдегидных смол (КФС) значительно отличается в зависимости от конечного мольного соотношения карбамид : формальдегид. Маломольные смолы ($K : \Phi = 1 : <1,1$) состоят преимущественно из линейных карбамидоформальдегидных олигомеров (КФ-олигомеров), отличающихся сравнительно низким содержанием метилольных групп II типа. При увеличении мольного соотношения $K : \Phi$ растёт количество ответвлений от основной цепи КФ-олигомеров и увеличивается содержание метилольных групп, главным образом II типа.

2. При отверждении маломольных КФС образуются полимеры, содержащие незначительное количество поперечных метиленовых связей, что негативно сказывается на водостойкости древесностружечных плит (ДСтП), изготовленных с их использованием. Средне- и высокомольные смолы (мольное соотношение $K : \Phi = 1 : 1,1\text{--}1,2$ и $1 : >1,2$) при отверждении образуют густую сетчатую структуру и обеспечивают сравнительно высокие физико-механические показатели ДСтП.

3. При увеличении мольного соотношения К : Ф при синтезе КФС в готовых смолах растёт содержание свободного формальдегида и метильных групп, снижается содержание свободного карбамида. Плиты, изготовленные с использованием высокомолекулярных смол, отличаются высоким содержанием формальдегида (более 30 мг/100 г абс. сух. плиты).

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Библиографический список

Васильев В.В. Экспресс-метод определения содержания формальдегида в древесных плитах // Бюллетень Ассоциации ЛЕСТЕХ. 2024. № 3(17). С. 32–35. URL: <https://alestech.ru/bulletin/article/185> (дата обращения: 01.09.2024).

Виршиа З., Бжезинский Я. Аминопласты: пер. с польского И.В. Холодовой. М.: Химия, 1973. 344 с.

Вьюнков С.Н., Васильев В.В. Карбамидоформальдегидные смолы с мольным соотношением формальдегида к карбамиду менее единицы // Древесные плиты: теория и практика : 22-я Междунар. науч.-прак. конф. / под ред. А.А. Леоновича. СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2019. С. 97–101. EDN: FBUOFR

Кастерина Т.Н., Калинина Л.С. Химические методы исследования синтетических смол и пластических масс. М.: Гос. научн.-техн. изд-во хим. лит.-ры, 1963. 288 с.

Николаев А.Ф. Синтетические полимеры и пластические массы на их основе. Издание 2-е, исправленное и дополненное. М.: Темплан, 1966. 768 с.

Огородников С.К. Формальдегид. Л.: Химия, 1984. 280 с.

Плотникова Г.П., Плотников Н.П. Модификация связующего для использования некондиционного сырья в производстве древесностружечных плит // Системы. Методы. Технологии. 2013. № 2(18). С. 142–146. EDN: RTJHIJ.

Романов Н.М. Химия карбамидо- и меламинаформальдегидных смол. М.: ООО Адвансед Солюшнз, 2016. 528 с.

Эльберт А.А. Химическая технология древесностружечных плит. М: Лесн. пром.-сть, 1984. 224 с.

Aizat A.G., Paiman B., Lee H.S., Zaidon A. Physico-mechanical properties and formaldehyde emission of rubberwood particleboard made with UF resin admixed with ammonium and aluminum-based hardeners // Pertanika J. Sci. & Technol. 2019. Vol. 27(1). P. 473–488.

Christjanson P., Pehk T., Simer K. Structure formation in urea-formaldehyde resin synthesis // Proc. Estonian Acad. Sci. 2009. Vol. 55. P. 212–225. DOI: 10.3176/chem.2006.4.04.

Corrêa C.A., Cunha A.B. da, Rios P.D., Teixeira M.Z., Liz G.C. de. The impact of altering the molar ratio on formaldehyde content and the physical and mechanical properties of MDF panels // J. Adhes. Sci. Technol. 2024. P. 1–19. DOI: 10.1080/01694243.2024.2402829.

Dorieh A., Mahmoodi N., Mamaghani M., Pizzi A., Mohammadi Zeydi M. Comparison of the properties of urea-formaldehyde resins by the use of formalin or urea formaldehyde condensates // *Journal of Adhesion Science and Technology*. 2018. P. 1–15. DOI: 10.1080/01694243.2018.192780.

Li J., Zhang Y. Morphology and Crystallinity of Urea-Formaldehyde Resin Adhesives with Different Molar Ratios // *Polymers*. 2021. Vol. 13 (5), no. 673. DOI: 10.3390/polym13050673.

Li T., Guo X., Liang J., Wang H., Xie X., Du G. Competitive formation of the methylene and methylene ether bridges in the urea–formaldehyde reaction in alkaline solution: a combined experimental and theoretical study // *Wood Science and Technology*. 2015. Vol. 49(3). P. 475–493. DOI: 10.1007/s00226-015-0711-2.

Mejdell T., Schjønby H.K. Simulation model for urea-formaldehyde reactors // *Macromol. Symp.* 2004. Vol. 206. P. 241–54. DOI: 10.1002/masy.200450219.

Park B.D., Jeong H.W. Hydrolytic stability and crystallinity of cured urea-formaldehyde resin adhesives with different formaldehyde/urea mole ratios // *Int. J. Adhes. Adhes.* 2011. Vol. 31. P. 524–529. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2011.05.001.

Rammon R.M., Johns W.E., Magnuson J., Dunker A. K. The Chemical Structure of UF Resins // *The Journal of Adhesion*. 1986. Vol. 19(2). P. 115–135. DOI: 10.1080/00218468608071217.

Wang H., Cao M., Li T., Yang L., Duan Z., Zhou X., Du G. Characterization of the Low Molar Ratio Urea–Formaldehyde Resin with ^{13}C NMR and ESI–MS: Negative Effects of the Post-Added Urea on the Urea–Formaldehyde Polymers // *Polymers*. 2018. Vol. 10(6), no. 602. DOI: 10.3390/polym10060602.

Xu G., Liang J., Zhang B., Wu Z., Lei H., Du G. Performance and structures of urea-formaldehyde resins prepared with different formaldehyde solutions // *Wood Science and Technology*. 2021. Vol. 55. P. 1419–1437. DOI: 10.1007/s00226-021-01280-y

References

Aizat A.G., Paiman B., Lee H.S., Zaidon A. Physico-mechanical properties and formaldehyde emission of rubberwood particleboard made with UF resin admixed with ammonium and aluminum-based hardeners. *Pertanika J. Sci. & Technol.*, 2019, vol. 27(1), pp. 473–488.

Christjanson P., Pekk T., Simer K. Structure formation in urea-formaldehyde resin synthesis. *Proc. Estonian Acad. Sci.*, 2009, vol. 55, pp. 212–225. DOI: 10.3176/chem.2006.4.04.

Corrêa C.A., Cunha A.B. da, Rios P.D., Teixeira M.Z., Liz G.C. de. The impact of altering the molar ratio on formaldehyde content and the physical and mechanical properties of MDF panels. *J. Adhes. Sci. Technol.*, 2024, pp. 1–19. DOI: 10.1080/01694243.2024.2402829.

Dorieh A., Mahmoodi N., Mamaghani M., Pizzi A., Mohammadi Zeydi M. Comparison of the properties of urea-formaldehyde resins by the use of formalin or

urea formaldehyde condensates. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2018, pp. 1–15. DOI: 10.1080/01694243.2018.1492780

El'bert A.A. Chemical Technology of Particle Boards. M.: Lesn. prom-st'. 1984. 224 p. (In Russ.)

Kasterina T.N., Kalinina L.S. Chemical methods for studying synthetic resins and plastics. M.: State Scientific and Technical Publishing House of Chemical Literature, 1963. 288 p. (In Russ.)

Li J., Zhang Y. Morphology and Crystallinity of Urea-Formaldehyde Resin Adhesives with Different Molar Ratios. *Polymers*, 2021, vol. 13 (5), no. 673. DOI: 10.3390/polym13050673

Li T., Guo X., Liang J., Wang H., Xie X., Du G. Competitive formation of the methylene and methylene ether bridges in the urea–formaldehyde reaction in alkaline solution: a combined experimental and theoretical study. *Wood Science and Technology*, 2015, vol. 49(3), pp. 475–493. DOI: 10.1007/s00226-015-0711-2.

Mejdell T., Schjønshy H.K. Simulation model for urea-formaldehyde reactors. *Macromol. Symp.*, 2004, vol. 206, pp. 241–254. DOI: 10.1002/masy.200450219.

Nikolaev A.F. Synthetic polymers and plastics based on them. 2nd edition, corrected and supplemented. M.: Templan, 1966. 768 p. (In Russ.)

Ogorodnikov S.K. Formaldehyde. L.: Chemistry, 1984. 280 p. (In Russ.)

Park B.D., Jeong H.W. Hydrolytic stability and crystallinity of cured urea-formaldehyde resin adhesives with different formaldehyde/urea mole ratios. *Int. J. Adhes.*, 2011, vol. 31, pp. 524–529. DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2011.05.001.

Plotnikova G.P., Plotnikov N.P. Modification of binder to use off-grade raw materials in chipboard production. *Systems Methods Technologies*, 2013, vol. 2(18), pp. 142–146. EDN: RTJHIJ. (In Russ.)

Rammon R.M., Johns W.E., Magnuson J., Dunker A.K. The Chemical Structure of UF Resins. *The Journal of Adhesion*, 1986, vol. 19(2), pp. 115–135. DOI: 10.1080/00218468608071217.

Romanov N.M. Chemistry of urea and melamine-formaldehyde resins. M.: Advanced Solutions LLC, 2016. 528 p. (In Russ.)

Vasiliev V.V. Rapid method for determining formaldehyde content in wood boards. *Bulletin of the LESTECH Association*, 2024, vol. 3(17), pp. 32–35. URL: <https://alestech.ru/bulletin/article/185> (accessed January 09, 2024). (In Russ.)

Vyunkov S.N., Vasiliev V.V. Urea-formaldehyde resins with a molar ratio of formaldehyde to urea less than one. *Wood boards: theory and practice* / Ed. A.A. Leonovich: 22nd Int. scientific-practical. Conf. SPb.: Publishing House of the Polytechnic University, 2019, pp. 97–101. EDN: FBUOFR. (In Russ.)

Wang H., Cao M., Li T., Yang L., Duan Z., Zhou X., Du G. Characterization of the Low Molar Ratio Urea–Formaldehyde Resin with ^{13}C NMR and ESI–MS: Negative Effects of the Post-Added Urea on the Urea–Formaldehyde Polymers. *Polymers*, 2018, vol. 10(6), no. 602. DOI: 10.3390/polym10060602.

Wirpsza Z., Brzezinski J. Aminoplastics: trans. from Polish by I.V. Kholodova. М.: Chemistry, 1973. 344 p. (In Russ.)

Xu G., Liang J., Zhang B., Wu Z., Lei H., Du G. Performance and structures of urea-formaldehyde resins prepared with different formaldehyde solutions. *Wood Science and Technology*, 2021, vol. 55, pp. 1419–1437. DOI: 10.1007/s00226-021-01280-y.

Материал поступил в редакцию 20.01.2024

Иванов Д.В., Никифорова П.К., Захаренкова М.Ю. Свойства карбаминоформальдегидных смол, синтезированных при разных мольных соотношениях карбамид : формальдегид // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2024. Вып. 251. С. 381–398. DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.381-398

Мольное соотношение карбамид : формальдегид является одним из основных параметров, определяющих рецептуру карбаминоформальдегидных смол. Во многом от мольного соотношения зависят строение основных компонентов смолы (карбаминоформальдегидных олигомеров, метилольных производных карбамида), свойства смол и материалов, изготовленных с их использованием. Цель работы – изучение строения компонентов карбаминоформальдегидных смол, изготовленных при разных мольных соотношениях карбамид : формальдегид; оценка влияния мольного соотношения на свойства смол и изготовленных с их использованием древесностружечных плит. Установлено, что маломольные смолы (мольное соотношение карбамид : формальдегид = 1 : <1,1) состоят преимущественно из линейных олигомеров, содержащих сравнительно низкое количество метилольных групп II типа. При отверждении маломольных смол образуется сетчатая структура с незначительным количеством поперечных метиленовых связей, что негативно сказывается на водостойкости древесностружечных плит, изготовленных с их использованием. При увеличении мольного соотношения карбамид : формальдегид растёт количество ответвлений от основной цепи карбаминоформальдегидных олигомеров, увеличивается содержание метилольных групп, растёт реакционная способность смол. Отверждённые средне- и высокомольные смолы (мольное соотношение карбамид : формальдегид = 1 : 1,1–1,2 и 1 : >1,2) отличаются густой сетчатой структурой и обеспечивают сравнительно высокие физико-механические показатели древесностружечных плит. При этом увеличение мольного соотношения карбамид : формальдегид приводит к значительному росту содержания формальдегида в древесностружечных плитах.

Ключевые слова: поликонденсация, карбамид, формальдегид, карбаминоформальдегидная смола, карбаминоформальдегидные олигомеры, древесностружечные плиты.

Ivanov D.V., Nikiforova P.K., Zakharenkova M.Yu. Properties of Urea-Formaldehyde Resins Synthesized at Different Molar Ratios. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhniceskoj Akademii*, 2024, iss. 251, pp. 381–398 (in Russian with English summary). DOI: 10.21266/2079-4304.2024.251.381-398

The formaldehyde/urea (F/U) molar ratio is one of the main parameters determining the formulation of urea-formaldehyde (UF) resins. The molar ratio largely determines the structure of the main components of the resin (UF oligomers, methylol derivatives of urea), as well as the properties of the resins and materials manufactured using them. The aim of this work is to research the structure of the UF resins synthesized at different F/U molar ratios; to assess the effect of the molar ratio on the properties of the resins and particleboards manufactured using them. It was found that the low molar ratio UF resin ($F/U = <1.1$) consist mainly of linear oligomers containing a insignificant amount of type II methylol groups. During curing of low molar ratio resins, a network structure with an insignificant amount of cross-bridges is formed, which negatively affects the water resistance of particleboards. With an increase in the F/U molar ratio, the number of branches of UF oligomers increases, also the content of methylol groups increases and the reactivity of the resins increases. Cured medium and high molar ratio UF resins ($F/U = 1.1\text{--}1.2$ and >1.2) are distinguished by a dense cross-linked structure and ensure comparatively high physical and mechanical properties of particle-boards. At the same time, an increase in the F/U molar ratio leads to a significant increase in the formaldehyde content in particleboards.

Keywords: polycondensation, urea, formaldehyde, urea-formaldehyde resin, urea-formaldehyde oligomers, particleboards.

ИВАНОВ Даниил Валерьевич – доцент кафедры технологии древесных и целлюлозных композиционных материалов Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова, кандидат технических наук. ORCID: 0000-0002-0001-2461. SPIN-код: 7886-4755; Researcher ID: ABF-7853-2020. Scopus Author ID: 57211013094

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: ivanov.d.v.SPB@yandex.ru

IVANOV Daniil V. – PhD (Technical), Associate Professor of the Department of Wood and Cellulose Composite Materials Technology at St.Petersburg State Forest Technical University. ORCID: 0000-0002-0001-2461. SPIN-code: 7886-4755, Researcher ID: ABF-7853-2020. Scopus Author ID: 57211013094.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: ivanov.d.v.SPB@yandex.ru

НИКИФОРОВА Полина Константиновна – менеджер по планированию производства HPL, ООО «Слотекс-И». ORCID: 0000-0001-8902-1075.

188671, тер. зона Общественно-Деловая Проба, зд. 2/3, с. п. Романовское, м. р-н Всеволожский, Ленинградская область, Россия. E-mail: polina435@inbox.ru

NIKIFOROVA Polina K. – HPL Production Planning Manager, «Slotex-I» LLC. ORCID: 0000-0001-8902-1075.

188671. Public-Business Probe Zone 2/3. Romanovskoye rural settlement. Vsevolozhsky metropolitan area. Leningrad region. Russia. E-mail: polina435@inbox.ru

ЗАХАРЕНКОВА Мария Юрьевна – студент кафедры древесных и целлюлозных композиционных материалов Санкт-Петербургского государственного лесотехнического университета имени С.М. Кирова. SPIN-код: 4685-0168.

194021, Институтский пер., д. 5, Санкт-Петербург, Россия. E-mail: mariiazakharenkova@icloud.com

ZAKHARENKOVA Maria Yu. – Student of the Department of Wood and Cellulose Composite Materials Technology at St.Petersburg State Forest Technical University. SPIN-код: 4685-0168.

194021. Institute per. 5. St. Petersburg. Russia. E-mail: mariiazakharenkova@icloud.com

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	5
1. ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО	
Шлапакова С.Н., Алехина И.В., Хоменок М.А., Морозов А.Н. Зимостойкость, засухоустойчивость и оценка декоративности <i>Corylus avellana</i> L. в условиях г. Брянска	6
Мартирова М.Б., Мамаев Н.А., Варенцова Е.Ю., Поповичев Б.Г., Пахучий В.В., Пахучая Л.М., Селиховкин А.В. Пространственная динамика состояния и комплексов болезней и вредителей таежных лесов северо-запада европейской части России	17
Сунгурова Н.Р., Страздаускене С.Р., Стругова Г.Н., Макаров С.С., Страздаускас С.Е. Ландшафтная организация территории спортивных сооружений в г. Архангельске	45
Капиталнин Д.Ю., Сидоренков В.М., Ачиколова Ю.С., Астапов Д.О., Рябцев О.В., Шекалев Р.В. Оценка качества таксации по результатам лесотаксационного дешифрирования данных спутниковой съемки Sentinel-2	62
Шишкина А.А., Карпун Н.Н. Видовой состав патогенных микромицетов на лесосеменных плантациях сосны обыкновенной в Московской области	78
Данилов Д.А., Яковлев А.А., Зайцев Д.А., Иванов А.А. Изменения в постагрозенных почвах в ходе восстановления древесной растительности в условиях юго-запада Ленинградской области	97
Чалкин А.А., Кулинич О.А., Козырева Н.И., Арбузова Е.Н. К изучению роли вершинного короеда <i>Ips acuminatus</i> в трансмиссии фитопатогенных нематод рода <i>Bursaphelenchus</i>	123
Коптев С.В., Алабдуллахалхасно Х. Оценка состояния и динамики лесов Архангельской области с использованием технологий дистанционного зондирования	141
Сурина Е.А., Демидова Н.А., Корчагов С.А., Конюшатов О.А., Гоголева Л.Г. Повышение продуктивности лиственно-хвойных насаждений рубками ухода в таежной зоне	158
Сорока А.О., Семенова Е.И., Недбаев И.С., Константинов А.В. Инструментарий оценки уровня опасности климатических рисков в лесном хозяйстве	172
Верховцева Е.П., Бруева Ж.А., Феклистов П.А., Грязькин А.В. Морфометрические параметры ягод и урожайность черники (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.) в разных типах леса в северной тайге	186
Демаков Ю.П., Шаронов Е.С., Королев А.С., Шейкина О.В. Методика экспресс-оценки плотности древесины в ценопопуляциях сосны обыкновенной	202
	399

Демина Н.А., Тюкавина О.Н. Применение системы гербицидов при выращивании сеянцев ели в открытом грунте	215
---	-----

Волков В.А., Каржаев Д.С., Сафроньчева Е.Д., Тис М.В., Чухландцева К.В., Шариавикова В.В., Потокина Е.К. Использование KASP- и HRM-маркеров для выявления полиморфизмов, влияющих на адаптивные признаки сосны и ели	229
---	-----

2. ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ЛЕСОЗАГОТОВОК

Андронов А.В., Тарадин Г.С., Болотин Д.В., Никонов В.С., Иготти М.М., Петросян С.С., Божбов В.Е. Математические модели сжатия упрочняющегося грунта для расчета колееобразования в элементарных функциях	245
---	-----

Ласточкин Д.М., Сидыганов Ю.Н., Кретицин В.И., Костромин Д.В. Анализ конструкции механизма вибрации с противовесом захватно-срезающего устройства	260
--	-----

Шадрин Р.А., Узрюмов С.А., Козлова И.К. Использование порубочных остатков в биотехнических целях в условиях лесничеств Северо-Запада Российской Федерации	271
--	-----

Васильев А.С. Модернизированная харвестерная головка	289
---	-----

Бухтояров Л.Д., Малюков С.В., Лысыч М.Н., Шавков М.В., Петков А.Ф., Попов М.А. Имитационная модель для анализа кинематики лесопосадочного аппарата цепного типа	301
--	-----

Кочнев А.М., Кривоногова А.С., Пушков Ю.Л. Обоснование показателей выбора трассы волокна с использованием принципов навигации	315
--	-----

Посыпанов С.В., Зарипов Ш.Г., Песков И.А. Обоснование гидродинамических нагрузок, воспринимаемых устройством для сплотки четырёхпакетных пучков в процессе эксплуатации	322
--	-----

3. ДРЕВЕСИНОВЕДЕНИЕ, ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЕРЕВОПЕРЕРАБОТКИ

Белова О.А., Чубинский А.Н. Исследование процесса отверждения укрывистых грунтов на полиуретановой основе	336
--	-----

Кантиева Е.В., Снегирева С.Н., Платонов А.Д. Влагопроводность ядровой древесины сосны в стволе дерева	350
--	-----

4. ХИМИЧЕСКАЯ ПЕРЕРАБОТКА ДРЕВЕСИНЫ. БИОТЕХНОЛОГИЯ

Леонович А.А., Замазий Л.В. Подсолнечная лузга как сырьё для плит типа ДСП	369
---	-----

Иванов Д.В., Никифорова П.К., Захаренкова М.Ю. Свойства карбамидоформальдегидных смол, синтезированных при разных мольных соотношениях карбамид: формальдегид	381
--	-----

CONTENTS

Preface	5
1. FORESTRY	
<i>Shlapakova S.N., Alekhina I.V., Khomenok M.A., Morozov A.N.</i> Winter hardiness, drought resistance and assessment of decorativeness of <i>Corylus avellana</i> L. in the conditions of Bryansk	6
<i>Martirova M.B., Mamaev N.A., Varentsova E.Yu., Popovichev B.G., Pakhuchiy V.V., Pakhuchaya L.M., Selikhovkin A.V.</i> Spatial dynamics of the state and complexes of diseases and pests of taiga forests in the north-west of the European part of Russia	17
<i>Sungurova N.R., Strazdauskas S.R., Strugova G.N., Makarov S.S., Strazdauskas S.E.</i> Landscape organization of the territory of sports facilities in Arkhangelsk	45
<i>Kapitalinin D.Yu., Sidorenkov V.M., Achikolova Yu.S., Astapov D.O., Ryabtsev O.V., Shchekalev R.V.</i> Assessment of the quality of taxation based on the results of forest taxation decryption of Sentinel-2 satellite imagery data	62
<i>Shishkina A.A., Karpun N.N.</i> Species list of pathogenic micromycetes on seed plantations of Scots pine in the Moscow region	78
<i>Danilov D.A., Yakovlev A.A., Zaitsev D.A., Ivanov A.A.</i> Changes in post-agricultural soils during the restoration of woody vegetation in the conditions of the south-west of the Leningrad Region	97
<i>Chalkin A.A., Kulinich O.A., Kozyreva N.I., Arbuzova E.N.</i> The research of the role of the sharp-toothed bark beetle <i>Ips acuminatus</i> in the transmission of phytopathogenic nematodes of the genus <i>Bursaphelenchus</i>	123
<i>Koptev S.V., Alabdullahalkhasno H.</i> Assessment of forest dynamics and condition in the Arkhangelsk region using remote sensing technologies and vegetation indices	141
<i>Surina E.A., Demidova N.A., Korchagov S.A., Konyushatov O.A., Gogoleva L.G.</i> Increasing the productivity of deciduous and coniferous forest stands by thinning in the taiga zone	158
<i>Soroka A.O., Semyonova E.I., Nedbaev I.S., Konstantinov A.V.</i> Climate Risk Assessment Toolkit for Forestry	172
<i>Verkhovtseva E.P., Brueva J.A., Feklistov P.A., Gryazkin A.V.</i> Morphometric parameters of berries and productivity of bilberry (<i>Vaccinium myrtillus</i> L.) in different types of forests in the northern taiga	186
<i>Demakov Yu.P., Sharapov E.S., Korolev A.S., Sheikina O.V.</i> Rapid assessment of wood density in the Scots pine cenopopulations	202
	401

Demina N.A., Tyukavina O.N. Application of the herbicide system in the cultivation of spruce seedlings in the open ground 215

Volkov V.A., Karzhaev D.S., Safronycheva E.D., Tis M.V., Chukhlantseva K.V., Sharshavikova V.V., Potokina E.K. Application of KASP and HRM markers for detecting polymorphisms affecting adaptive traits in Scots pine and Norway spruce 229

2. TECHNOLOGY AND EQUIPMENT OF LOGGING INDUSTRIES

Andronov A.V., Taradin G.S., Bolotin D.V., Nikonov V.S., Igotti M.M., Petrosyan S.S., Bozhbov V.E. Mathematical models of strengthening ground compaction for rutting estimation eliminated in elementary functions 245

Lastochkin D.M., Sidiganov Yu.N., Cretinin V.I., Kostromin D.V. Analysis of the design of the vibration mechanism with a counterweight of the gripping-cutting device 260

Shadrin R.A., Ugryumov S.A., Kozlova I.K. The use of felling residues for biotechnical purposes in the conditions of forestry in the North-West of the Russian Federation 271

Vasilev A.S. Modernized harvester head 289

Bukhtoyarov L.D., Malyukov S.V., Lysych M.N., Shavkov M.V., Petkov A.F., Popov M.A. Simulation model for analyzing the kinematics of chain-type forest planting machine 301

Kochnev A.M., Krivonogova A.S., Pushkov Yu.L. Substantiation of indicators for choosing a dragging route using the principles of navigation 315

Posypanov S.V., Zaripov Sh.G., Peskov I.A. Justification of hydrodynamic loads perceived by the device for forming four-packet beams during its operation 322

3. WOOD SCIENCE. MECHANICAL WOODWORKING INDUSTRY

Belova O.A., Chubinsky A.N. Study of the Curing Process of Opaque Polyurethane-Based Primers 336

Kantieva E.V., Snegireva S.N., Platonov A.D. Moisture conductivity of pine core wood in a tree trunk 350

4. CHEMICAL TECHNOLOGY OF WOOD. BIO TECHNOLOGY

Leonovich A.A., Zamaziy L.V. Sunflower husk as a raw material for particle board type plates 369

Ivanov D.V., Nikiforova P.K., Zakharenkova M.Yu. Properties of Urea-Formaldehyde Resins Synthesized at Different Molar Ratios 381

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Научное издание

ИЗВЕСТИЯ
САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКОЙ
ЛЕСОТЕХНИЧЕСКОЙ
АКАДЕМИИ

Выпуск 251

Издаются с 1886 года

Редактор В.Н. Добронравина

Компьютерная верстка Е.А. Корнуковой

Подписано в печать с оригинал-макета 25.11.2024. Выход в свет 28.12.2024. Формат 150*210.
Печать цифровая. Уч.-изд. л. 25.25. Печ. л. 25.25. Тираж 500 экз. Заказ № 90 С 210. Свободная цена

Санкт-Петербургский государственный лесотехнический университет
имени С.М. Кирова

Издательско-полиграфический отдел СПбГЛТУ
194021, Санкт-Петербург, Институтский пер., 5, литер У